



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO INDUSTRIAL

Título del proyecto:

ESTUDIO DE DIFERENTES TOPOLOGÍAS DE GENERACIÓN EÓLICA

Alumno: Jesús Ángel Álvarez Echarri

Tutor: Jesús López Taberna

Pamplona, 3 de junio de 2011

Indice

1.	Introducción.....	4
2.	El sector eólico en la actualidad	4
3.	Topologías de generación eólica	8
3.1	Velocidad fija.....	8
3.2	Máquina doblemente alimentada (DFIG o MADA).....	9
3.2.1	Principio de funcionamiento	9
3.2.2	Conversión eléctrica con MADA.....	14
3.3	Full Converter	17
3.3.1	Principio de funcionamiento	17
4.	Control MADA y Full Converter	20
4.1	Transformaciones de Clarke y Park.....	20
4.2	PLL	21
4.3	Control de la MADA	22
4.3.1	Modelización de la MADA.....	22
4.3.2	Cálculo de los ángulos necesarios para la transformación de Park.....	26
4.3.3	Sistema de conversión.....	26
4.4	Control Full Converter.....	29
4.4.1	Modelización máquina de imanes.....	29
4.4.2	Sistema de conversión.....	33
4.5	Cálculo de los parámetros de los PI.....	35
4.5.1	Convertidor lado red	37
4.5.2	Convertidor lado máquina.....	43
5.	Topología xDFM.....	49
5.1	Control mediante convertidor de potencia.....	52
5.1.1	Convertidor lado máquina.....	52
5.1.2	Convertidor lado exciter.....	53
5.1.3	Bus de continua	55

6.	Simulaciones	55
6.1	Máquina asíncrona doblemente alimentada.....	58
6.2	Full converter	65
6.3	xDFM.....	70
7.	Comparaciones	83
8.	Bibliografía.....	85

1. Introducción

Este proyecto fin de carrera se enmarca dentro del campo de la electrónica de potencia, aplicada en este caso a la generación eléctrica a partir de energías renovables, más concretamente al sector eólico.

Será objeto de este proyecto estudiar las topologías de generación eólica más utilizadas en el mercado y presentar una nueva solución de generación denominada “xDFM” ideada por Ingeteam. Dentro del estudio el PFC se centra en las características generales de las diferentes topologías haciendo hincapié en el control de cada una de ellas, más concretamente en la modelización de las variables y los elementos en ejes d-q señalando las ventajas que dicha modelización proporciona.

Además se da a conocer la plataforma PSCAD, que es el software utilizado como herramienta de simulación, mostrando los pasos necesarios para que partiendo de un esquema dado se haga una simulación fiable. Se explica los elementos a utilizar, la forma de introducir los datos y la manera de extraer los resultados.

2. El sector eólico en la actualidad

Las energías renovables han cobrado una gran importancia en la actualidad debido a los problemas existentes con las principales fuentes utilizadas en la generación eléctrica, éstas se basan principalmente en la combustión de petróleo, gas natural o carbón como en la fisión nuclear. La principal ventaja de estas fuentes respecto a las energías renovables es la estabilidad en la generación que asegura el suministro eléctrico pero tienen como inconveniente que los combustibles utilizados no son inagotables, además de la contaminación que originan en la combustión y con los residuos en el caso de las nucleares. Dichos inconvenientes llevan asociados problemas tanto económicos como de salud que se están traduciendo en una apuesta por las energías renovables tanto en implantación como investigación.

Dentro de las energías renovables se encuentra la generación eólica que aprovecha la energía cinética del viento para convertirla en eléctrica, de aquí concluimos que es necesaria la presencia de viento. Este aspecto tiene como efecto negativo que no se puede asegurar la generación eléctrica en cualquier instante y hay que apoyarse en otras fuentes estables pero tiene como efecto positivo que el viento no es exclusivo de un lugar del planeta, esto hace que la energía eólica pueda ser una apuesta válida en cualquier lugar.

Los principales países del mundo por potencia eólica instalada son Estados Unidos, Alemania, China, España e India representando alrededor del 70% de la potencia total mundial.

Como se menciona en el apartado anterior, España esta entre los principales países del mundo en instalación de energía eólica, se compara a continuación la potencia instalada en el año 2000 con la del 2009 detallando el tipo de central:

	Sistema peninsular	Sistema extrapeninsular	Total nacional
Hidráulica	16.524	1	16.525
Nuclear	7.799	-	7.799
Carbón	11.542	510	12.052
Fuel/gas (*)	8.214	2.460	10.674
Total régimen ordinario	44.079	2.971	47.050
Total régimen especial	8.318	195	8.513
Total	52.397	3.166	55.563

(*) Incluye GICC (Elcogás)

Tabla 1. Balance de potencia a 31-12-2000. Sistema eléctrico nacional (MW).

	1996	1997	1998	1999	2000
Renovables	1.419	1.731	2.165	3.045	3.518
Hidráulica	1.026	1.095	1.158	1.290	1.341
Otras renovables	392	636	1.007	1.755	2.177
Biomasa	83	84	87	120	127
Eólica	163	405	759	1.460	1.875
R.S. Industriales	76	76	88	100	100
R.S. Urbanos	69	70	71	74	74
Solar	1	1	1	1	1
No renovables	2.393	2.867	3.544	4.151	4.800
Carbón residual	47	47	54	54	54
Carbón	69	69	69	69	69
Fuel-Gasoil	543	748	919	1.114	1.235
Gas de refinería	209	209	209	209	209
Gas natural	1.527	1.795	2.293	2.705	3.233
Total	3.812	4.598	5.709	7.196	8.318

Tabla 2. Balance de potencia en régimen especial (MW). Evolución 1996-2000.

	Sistema peninsular		Sistemas extrapeninsulares		Total nacional	
	MW	% 10/09	MW	% 10/09	MW	% 10/09
Hidráulica	16.657	0,0	1	0,0	16.658	0,0
Nuclear	7.716	0,0	-	-	7.716	0,0
Carbón	11.380	0,2	510	0,0	11.890	0,2
Fuel / gas ⁽¹⁾	2.860	-4,9	3.029	2,3	5.889	-1,3
Ciclo combinado	25.220	9,3	1.624	17,0	26.844	9,8
Total régimen ordinario	63.833	3,3	5.164	6,3	68.997	3,5
Eólica	19.813	5,8	146	0,0	19.959	5,8
Solar	4.018	15,5	169	11,1	4.188	15,3
Resto régimen especial	9.783	0,6	160	34,8	9.942	1,0
Total régimen especial	33.614	5,3	475	13,9	34.089	5,4
Total	97.447	4,0	5.639	6,9	103.086	4,1

Tabla 3. Balance de potencia a 31-12-2010. Sistema eléctrico nacional (MW).

En el siguiente gráfico se muestra la potencia instalada en 2010 de forma más ilustrativa:

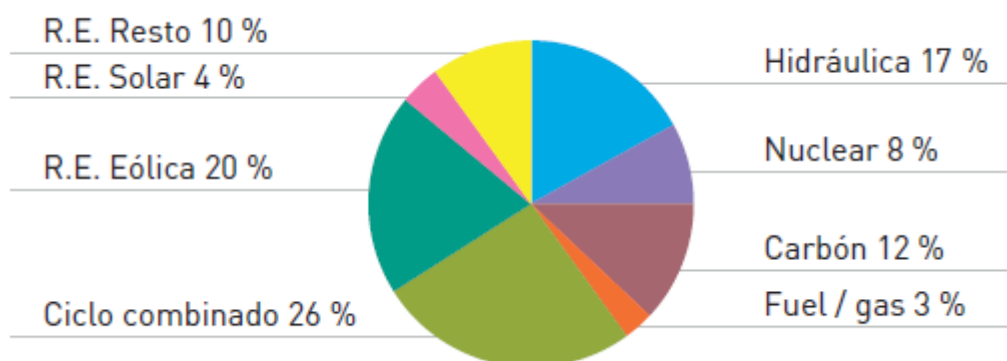


Figura 1. Potencia instalada en MW a 31/12/2010

Se observa que la generación eólica está encuadrada dentro de la potencia instalada en régimen especial, tomando como referencia el año 2000 se ve en la tabla 4 que la potencia eólica instalada es de 1.875 MW frente a los 52.397 MW totales, lo que supone un 3,6%. Se compara este dato con el de 2010 donde la potencia eólica instalada asciende a 19.959 MW frente a los 103.086 MW totales, lo que supone entorno a un 20%. De aquí se concluye que la demanda de consumo general ha aumentado en casi un 100% y que la apuesta por la potencia eólica es una realidad ya que ha adquirido un papel importante que no tenía hace una década, incluso por encima de otras fuentes renovables.

La conexión de generadores eólicos a la red hace que éstos causen efectos de perturbación en la misma, al comienzo del desarrollo de la eólica era frecuente ver

generadores aislados conectados a media o baja tensión, éstos debido a que la generación de potencia no es estable, ya sea porque la velocidad del viento no lo sea o porque el viento no sea uniforme en todo el área barrida por las palas, se inyecta en la red corriente variable que origina caídas o subidas de la tensión en las impedancias de red. La impedancia de red es mínima en las redes de alta tensión, por ello hoy en día se instalan parques eólicos conectados a una red de alta tensión para minimizar estos efectos.

Otro aspecto importante es la respuesta ante huecos de tensión, la tensión de red cae y es necesario aportar potencia reactiva desde las fuentes de generación para ayudar a restaurar la tensión, en un principio los generadores eólicos eran desconectados ante un hueco de tensión para no sufrir averías, hoy en día ante la importancia de participación de la eólica en el suministro es necesario que aporte reactiva a la red durante un hueco, por ello se ha creado una normativa que hay que cumplir y que cada vez es más restrictiva. Actualmente en España hay que cumplir el procedimiento de operación “P.O. 12.3. Requisitos de respuesta frente a huecos de tensión de las instalaciones eólicas” que especifica lo siguiente:

“Con el objeto de poder recibir el complemento definido en la disposición adicional cuarta del Real Decreto 436/2004, se debe cumplir el presente documento en el momento de poner en servicio la nueva instalación, o la ampliación de la instalación existente. Para instalaciones ya existentes, se da un plazo de tiempo de tres años para adaptar la instalación al presente documento. Si transcurrido este plazo no se ha realizado la adaptación, ya no será posible percibir el complemento correspondiente”.

3. Topologías de generación eólica

Existen diferentes tipos de topologías de generación en función de la forma que conectemos el generador a la red, entre ellas:

- Velocidad fija
- Máquina asíncrona doblemente alimentada (MADA)
- Full Converter

A continuación se describe cada una de ellas centrándose en la generación con MADA y Full Converter debido a que son las más importantes dentro del panorama actual.

3.1 Velocidad fija

Fueron los primeros sistemas en instalarse y los más utilizados en los comienzos de la energía eólica. En este sistema de velocidad fija el generador, normalmente asíncrono de jaula de ardilla, tiene el estator conectado directamente a red, sin utilizar un convertidor de potencia. Al estar conectado directamente a red sin elementos intermedios cualquier fluctuación en la velocidad del viento va a ser vista en la red como un cambio en la frecuencia de la potencia generada, es decir la red verá fluctuaciones instantáneas.

El rango de velocidades de viento en el cual estamos generando a plena carga es muy pequeño, por lo que el sistema no es muy eficiente. Tiene como ventaja que es robusto debido a su sencillez y bajo número de componentes que integra.

Una solución para ampliar el rango de velocidades de viento en las que producir potencia a plena carga es mediante la variación de la resistencia rotórica. Al añadir estas resistencias varía la corriente que fluye por el rotor del generador. No podemos variar el deslizamiento de la máquina, ya que este viene impuesto por la frecuencia de red y por la frecuencia de rotación mecánica del rotor. Sin embargo, conociendo el deslizamiento en cada momento, podemos variar la resistencia rotórica de forma que introducimos en el rotor la corriente deseada. El mayor problema de esta configuración es la necesidad de acceder al rotor mediante el uso de anillos rozantes y escobillas. Para evitar el uso de anillos rozantes se pueden incluir las resistencias rotóricas en el rotor de la máquina.

Otra desventaja es la pérdida de eficiencia debido a la disipación de potencia en las resistencias acopladas al rotor, la potencia producida en el rotor debe ser disipada no pudiendo aprovecharse para transmitirla a la red.

Existe el inconveniente de que se debe utilizar un banco de condensadores, que puede ocasionar resonancias en la red, debido a que el generador consume potencia reactiva y la red no quiere dar potencia reactiva ya que ésta le ayuda a mantener el nivel de tensión.

3.2 Máquina doblemente alimentada (DFIG o MADA).

Antes de comenzar a describir el funcionamiento de la MADA en un sistema eólico, introduciremos algunos conceptos sobre sus principios de funcionamiento y características que nos ayudarán a comprender su uso, funcionamiento y control.

Comenzaremos por explicar el funcionamiento de la máquina asíncrona, que en este caso funcionará como generador, es decir, a partir de una potencia mecánica entrante, que será extraída del viento a partir del movimiento de las palas del aerogenerador, obtendremos una potencia eléctrica que introduciremos a la red eléctrica.

La máquina asíncrona o de inducción es un tipo de máquina eléctrica que está formada por una parte fija, denominada estátor, y otra parte móvil, denominada rotor, que gira concéntrica al estátor, el rotor puede ser de dos tipos: a) de jaula de ardilla; b) de rotor bobinado.

3.2.1 Principio de funcionamiento

Realizamos el estudio a partir de una máquina asíncrona trifásica de rotor bobinado (la de jaula de ardilla se analiza de igual manera suponiendo tres bobinados equivalentes). El estátor está constituido de bobinados distribuidos de paso acortado y con un determinado número de polos que representan las tres fases de un sistema trifásico.

Alimentamos el estátor con un sistema trifásico equilibrado de corrientes, que en nuestro caso viene impuesto por la red eléctrica, ya que tenemos el estátor directamente conectado a ella.

$$i_A = \sqrt{2}I_s \cos(\omega_s t) ; \quad i_B = \sqrt{2}I_s \cos\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) ; \quad i_C = \sqrt{2}I_s \cos\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

Éstas al estar desfasadas 120° en el tiempo y circular por tres devanados desfasados 120° eléctricos en el espacio, generan según el Teorema de Ferraris, un campo magnético giratorio F_{mms} que gira a la velocidad de sincronismo Ω_s

$$F_{mms}(\theta, t) = \frac{3N_{seq}\sqrt{2}I_s}{\pi} \sin(\theta - \omega_s t) \qquad \Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$$

Despreciando las pérdidas en resistencias internas y flujos de fugas la tensión inducida en cada devanado será:

$$v_A = \frac{d\psi_A}{dt} \quad v_B = \frac{d\psi_B}{dt} \quad v_C = \frac{d\psi_C}{dt}$$

Al estar el estátor conectado a la red, es ésta la que impone el flujo en cada devanado.

El rotor está constituido también por un devanado trifásico distribuido de paso acortado, los tres bobinados se conectan en estrella y los tres extremos de los conductores que quedan libres se conectan a 3 anillos rozantes que rozan con tres escobillas mediante las cuales se sacan al exterior los contactos eléctricos.

Suponemos inicialmente el rotor en circuito abierto, éste, debido al campo magnético creado en el entrehierro por el estátor que gira a Ω_s , ve un campo magnético variable ya que está girando a una velocidad Ω_m distinta a la de sincronismo, debido a este campo variable se inducen tensiones en las bobinas del rotor que, despreciando resistencias internas y flujos de fugas, se pueden calcular como:

$$v_a = \frac{d\psi_a}{dt} \quad \psi_a = N_{req} \phi_a \quad \omega_m = p\Omega_m$$

ϕ_a : Flujo del entrehierro visto por el devanado “a”.

Obtenemos así las tensiones inducidas en cada devanado del rotor, que como se observa es un sistema equilibrado de tensiones:

$$v_a = -N_{req} \phi_{\max} (\omega_s - \omega_m) \text{sen}((\omega_s - \omega_m)t + \theta_{r0})$$

$$v_b = -N_{req} \phi_{\max} (\omega_s - \omega_m) \text{sen}\left((\omega_s - \omega_m)t + \theta_{r0} - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$v_c = -N_{req} \phi_{\max} (\omega_s - \omega_m) \text{sen}\left((\omega_s - \omega_m)t + \theta_{r0} - \frac{4\pi}{3}\right)$$

La frecuencia y pulsación de las tensiones y corrientes en el rotor, f_r y ω_r son:

$$\omega_r = \omega_s - \omega_m \quad f_r = \frac{\omega_r}{2\pi}$$

La pulsación de las variables eléctricas del rotor es la diferencia entre las velocidades del campo magnético giratorio y mecánica del rotor, expresadas ambas magnitudes eléctricas, por este motivo, se definimos el deslizamiento s como la relación

entre la pulsación del rotor y la velocidad eléctrica del campo magnético (o velocidad eléctrica de sincronismo):

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} = \frac{\omega_r}{\omega_s} = \frac{f_r}{f_s} = \frac{\Omega_s - \Omega_m}{\Omega_s} = \frac{\Omega_r}{\Omega_s}$$

El deslizamiento es un parámetro fundamental de la máquina asíncrona. Expresa la “distancia” relativa que hay entre la velocidad a la que gira la máquina y la velocidad de sincronismo, como referencia su valor nominal suele estar comprendido 0.02 y 0.04.

En función del deslizamiento, la ecuación de tensión para el rotor queda:

$$v_a = -N_{req} \phi_{max} s \omega_s \sin(s \omega_s t + \theta_{r0})$$

Si el deslizamiento fuera 0, la máquina giraría a la velocidad de sincronismo, y el rotor no vería variación de flujo magnético, por lo que v_a sería 0, en cambio si el rotor estuviera bloqueado, s valdría 1, y las ecuaciones de rotor y estator serían similares a las de un transformador.

A continuación cortocircuitamos el rotor con lo que circulará un sistema trifásico de corrientes desfasadas 120° en el tiempo por los devanados del rotor, que están desfasados 120° en el espacio, así que por el Teorema de Ferraris se crea un campo magnético rotatorio F_{mmr} , éste gira a Ω_r respecto del rotor, dado que el rotor está girando mecánicamente a Ω_m , la velocidad total del campo magnético generado en el rotor es:

$$\Omega_{F_{mmr}} = \Omega_r + \Omega_m = \Omega_s \quad \Omega_r = \frac{\omega_r}{p}$$

El campo magnético F_{mmr} generado por el rotor gira a la misma velocidad, velocidad de sincronismo, que el del estator F_{mms} para cualquier velocidad de la máquina.

Como consecuencia de la interacción de los campos magnéticos del estator y del rotor, se produce un par de magnitud proporcional a las amplitudes de ambos campos y al seno de ángulo de desfase entre ambos, además para que el valor del par sea constante los dos campos deben girar a la misma velocidad, la expresión del par es:

$$T = -K * F_{mms} * F_{mmr} * \sin(\theta)$$

Si la máquina gira a la velocidad de sincronismo (Ω_s), los devanados del rotor no ven un campo magnético variable con lo que no se inducen tensiones, por tanto las corrientes por el rotor son nulas e igualmente el campo magnético generado en el rotor (F_{mmr}), como consecuencia y fijándonos en la expresión del par podemos observar que a la velocidad de sincronismo el par generado por la máquina asíncrona es igual a cero, es decir no genera par.

Para derivar el modelo completo de la máquina asíncrona en régimen permanente, se incorporan ahora las resistencias internas y los flujos de fugas.

En el caso del estátor, las ecuaciones son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 v_A &= R_s i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \\
 \Psi_{totalA} &= \Psi_{fugasA} + \Psi_{magnéticoA} \\
 \psi_A &= \psi_{fA} + N_{seq} \phi_{Ae} \begin{cases} \psi_{fA} = L_{fs} i_A \\ \phi_{Ae} = \phi_{max} \cos(\omega_s t + \theta_{s0}) \end{cases} \\
 v_A &= R_s i_A + L_{fs} \frac{di_A}{dt} - N_{seq} \phi_{max} \omega_s \sin(\omega_s t + \theta_{s0})
 \end{aligned}$$

Φ_{Ae} : flujo del entrehierro visto por el devanado A.

Y para el rotor:

$$\begin{aligned}
 v_a &= R_r i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \\
 \Psi_{total_a} &= \Psi_{fugas_a} + \Psi_{magnético_a} \\
 \psi_a &= \psi_{fa} + N_{req} \phi_{ae} \begin{cases} \psi_{fa} = L_{fr} i_a \\ \phi_{ae} = \phi_{max} \cos[(\omega_s - \omega_m)t + \theta_{r0}] \end{cases} \\
 v_a &= R_r i_a + L_{fr} \frac{di_a}{dt} - N_{req} \phi_{max} \omega_r \sin(\omega_r t + \theta_{r0})
 \end{aligned}$$

Φ_{ae} : flujo del entrehierro visto por el devanado a.

Reorganizamos las ecuaciones anteriores, introducimos el deslizamiento y obtenemos las expresiones de las fuerzas electromotrices inducidas tanto en el estátor, e_A , como en el rotor, e_a :

$$\begin{aligned}
 e_A &= v_A - i_A \cdot R_s - L_{fs} \cdot \frac{di_A}{dt} = -N_{eqs} \cdot \phi_{max} \cdot \omega_s \cdot \sin(\omega_s \cdot t + \theta_{s0}) \\
 e_a &= v_a - i_a \cdot R_r - L_{fr} \cdot \frac{di_a}{dt} = -N_{eqr} \cdot \phi_{max} \cdot s \cdot \omega_s \cdot \sin(s \cdot \omega_s \cdot t + \theta_{r0})
 \end{aligned}$$

A partir de estas ecuaciones podemos sugerir un cierto circuito equivalente de la máquina similar al del transformador teniendo en cuenta algunas diferencias como que las frecuencias son diferentes en ambos devanados, y la relación de transformación depende, no solo de la relación de espiras, sino que además depende del deslizamiento del rotor.

$$a = \frac{N_{eqs}}{N_{eqr} \cdot s}$$

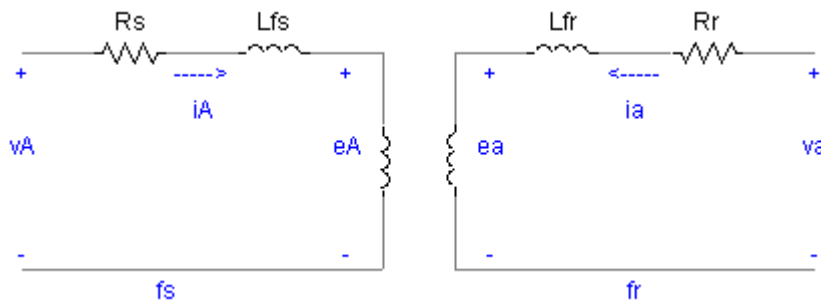


Figura 2. Circuito equivalente de la máquina.

A nosotros nos interesa obtener un modelo de circuito equivalente en régimen permanente de la MADA, tomando como base el estudio realizado, haciendo una serie de suposiciones y equivalencias y teniendo en cuenta que en la MADA tenemos el rotor alimentado por una fuente de tensión, que es un convertidor, de valor V_{con} , obtenemos el siguiente modelo de circuito equivalente en régimen permanente:

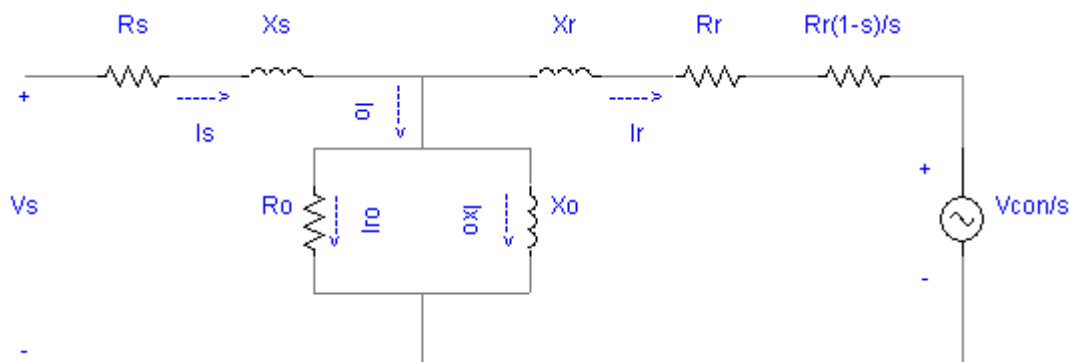


Figura 3. Circuito equivalente en régimen permanente.

Parámetros:

- R_s : Resistencia devanado del estátor
- R_r : Resistencia devanado del rotor referida al estátor
- X_s : Reactancia de fugas del estátor

- X_r : Reactancia de fugas del rotor referida al estátor
- R_0 : Resistencia de pérdidas magnéticas
- X_0 : Reactancia de magnetización

Variables:

- V_s, I_s : tensión y corriente por fase del estátor
- I_r : corriente por el rotor referida al estátor
- I_0 : corriente de vacío
- I_{R0} : componente de pérdidas de la corriente de vacío
- I_{X0} : componente de magnetización de la corriente de vacío

3.2.2 Conversión eléctrica con MADA

Una vez estudiado el funcionamiento de la máquina como intercambiadora de energía, en este caso de mecánica a eléctrica, estudiaremos cómo utilizarla en la generación eólica. Aprovechamos la energía del viento para que haga girar el rotor de nuestra máquina y podamos extraer energía eléctrica de ella. A su vez veremos cómo obtener el máximo rendimiento a esta energía incorporando un sistema de conversión electrónico en el rotor de la máquina.

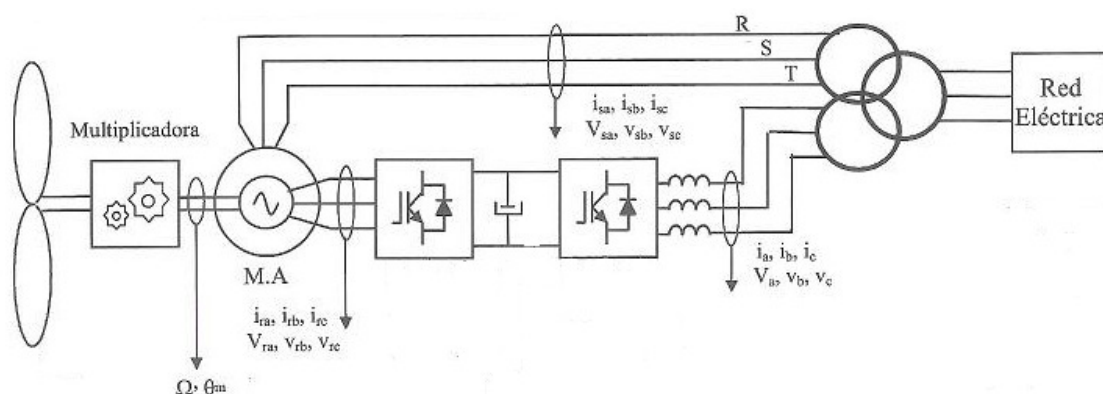


Figura 4. Conversión eléctrica con MADA.

El sistema de conversión está compuesto por dos convertidores trifásicos que actúan indistintamente como inversores o rectificadores, denominaremos convertidor lado máquina al que está conectado al rotor y convertidor lado red al que está conectado a la red. Este sistema interconecta el rotor y la red permitiendo el flujo de potencia entre ambos.

Con este esquema el campo del rotor ya no es inducido directamente por el estátor, sino que se controla con el convertidor lado máquina, este control se hace extensivo a las variables eléctricas del rotor, que a su vez permiten el de la potencia activa y reactiva intercambiada por la máquina con la red. Este control sobre el rotor dota a esta configuración de dos características importantes:

- Permite generar potencia activa tanto a velocidades superiores como inferiores a la de sincronismo.
- Permite controlar la potencia reactiva del estátor, la máquina puede trabajar con factor de potencia unidad e incluso aportar energía reactiva.

A partir del circuito equivalente de la MADA suponiendo despreciables las pérdidas magnéticas y en R_s , establecemos las siguientes expresiones para las potencias de la máquina:

- P_{mec} : potencia mecánica desarrollada por la máquina en el eje
- P_s : potencia absorbida por el estátor (también es la potencia electromagnética P_{em} transferida a través del entrehierro)
- P_r : potencia absorbida por el rotor
- φ_r : ángulo de desfase del convertidor

$$P_{mec} = 3 \left(I_r^2 \frac{R_r}{s} + \frac{I_r V_{con} \cos \varphi_r}{s} \right) (1-s)$$

$$P_s = P_{em} = 3 \left(I_r^2 \frac{R_r}{s} + \frac{I_r V_{con} \cos \varphi_r}{s} \right) = \frac{P_{mec}}{(1-s)}$$

$$P_r = 3 (I_r^2 R_r + I_r V_{con} \cos \varphi_r) = \frac{P_{mec}}{(1-s)} s$$

Como ya hemos comentado anteriormente la máquina entrega potencia a velocidades superiores e inferiores a la de sincronismo, pero el flujo de potencia no es igual en ambas configuraciones, para $\Omega > \Omega_s$ entregamos potencia tanto por estátor como por rotor y para $\Omega < \Omega_s$ consumimos potencia por el rotor y entregamos por el estátor.

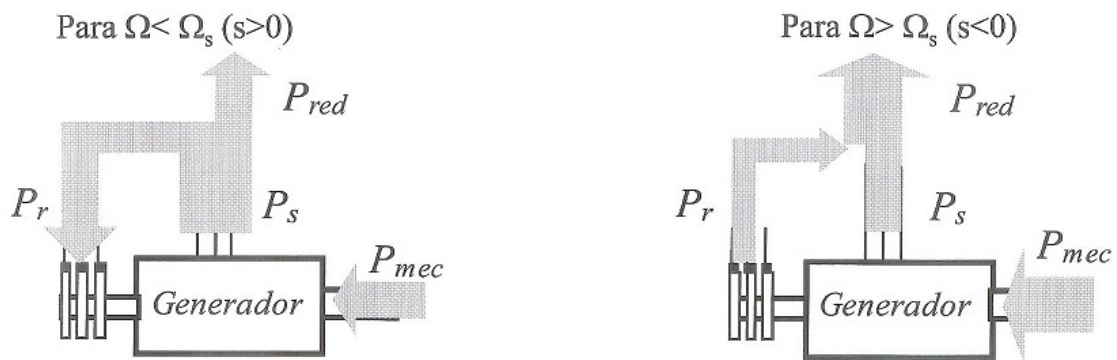


Figura 5. Flujo de potencias de la MADA.

Dado que la potencia convertida aumenta con el cubo de la velocidad del viento, es decir con Ω , el tamaño del convertidor lo fija la máxima velocidad permitida. Por ejemplo para una velocidad máxima de $1.5 \Omega_s$, el convertidor tiene que ser dimensionado para una potencia igual al 33% de la potencia de la máquina. Lógicamente en el dimensionado también hay que tener en cuenta la potencia reactiva a introducir por rotor. Esta característica del dimensionado del convertidor supone una gran ventaja a esta configuración.

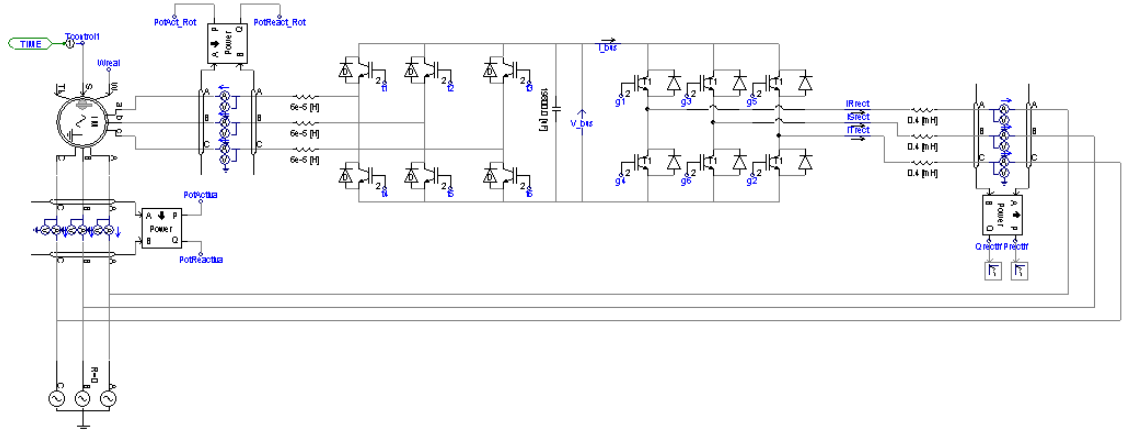


Figura 6. Esquema general de la MADA.

3.3 Full Converter

En este tipo de topología tenemos el generador conectado a la red a través de un convertidor de potencia que tiene como misión principal variar la frecuencia de la potencia generada de forma que sea la misma que la de la red.

En la generación full converter lo más común es utilizar generadores síncronos, aunque también se puede implementar con generador asíncrono de jaula de ardilla, por ello comenzaremos por explicar el funcionamiento del generador síncrono.

3.3.1 Principio de funcionamiento

La máquina síncrona es una máquina de corriente alterna, generalmente trifásica, en la cual la relación entre la frecuencia de las variables eléctricas y la velocidad de giro, en régimen permanente, es igual al número de pares de polos, es decir, fijando la velocidad de giro la frecuencia de la tensión queda fijada de forma independiente a la carga. Es muy utilizada como generador debido a que presenta buenas características como:

- Para sistemas aislados podemos controlar de forma independiente la frecuencia(a partir de la velocidad) y la amplitud de la tensión (a partir de la corriente de excitación).
- Para conexión a red podemos controlar independientemente la potencia activa (a partir de la máquina motriz) y reactiva (a partir de la corriente de excitación).

Constructivamente se compone de forma general del estátor y el rotor, el primero es similar al de la máquina asíncrona, es fijo y en él alojamos un bobinado trifásico de paso acortado y el segundo es móvil y se debe generar un campo magnético de distribución espacial senoidal a largo del entrehierro y de amplitud máxima constante, en régimen permanente el circuito magnético ve un flujo constante y no hay pérdidas magnéticas.

Tenemos dos tipos de máquinas síncronas según como obtengamos la excitación, en el primer caso incorporamos un bobinado distribuido en la periferia del rotor por el que circula una corriente continua que genera el campo magnético del rotor y en el segundo caso tenemos pegados sobre la superficie del rotor unos imanes permanentes que crean el campo magnético.

A continuación explicamos cómo se convierte la energía mecánica del rotor, debida a la velocidad del viento, en energía eléctrica para suministrar a la red.

Suponemos una máquina síncrona con una bobina equivalente en el rotor, de N_{req} espiras, por la que circula una corriente continua I_r y otra en el estátor, de N_{seq} espiras, que se deja en circuito abierto con el rotor girando a una velocidad Ω_s . La distribución magnética a lo largo del entrehierro es senoidal y se desplaza junto al rotor, así la bobina del estátor ve un flujo que depende del ángulo, es decir un flujo variable que induce una tensión de vacío $e_{AA'}$, ésta puede expresarse a partir del flujo por polo generado en el rotor (ϕ_{pr}), en convenio generador, como:

$$\phi_{Ar} = \phi_{pr} \cos(p\Omega_s t) \quad \text{con} \quad \phi_{pr} = \frac{4\mu_0 N_{req} l R}{\pi g p^2} I_r$$

$$e_{AA'} = -\frac{d\psi_A}{dt} = -N_s \frac{d\phi_{Ar}}{dt} = N_{seq} p \phi_{pr} \Omega_s \sin(p\Omega_s t)$$

$$e_{BB'} = -\frac{d\psi_B}{dt} = -N_s \frac{d\phi_{Br}}{dt} = N_{seq} p \phi_{pr} \Omega_s \sin(p\Omega_s t - \frac{2\pi}{3})$$

$$e_{CC'} = -\frac{d\psi_C}{dt} = -N_s \frac{d\phi_{Cr}}{dt} = N_{seq} p \phi_{pr} \Omega_s \sin(p\Omega_s t - \frac{4\pi}{3})$$

Sí expresamos la tensión inducida en el resto de las fases vemos que tenemos un sistema trifásico equilibrado.

Partiendo de las expresiones anteriores podemos expresar el valor eficaz de la tensión de vacío E_v y extraer algunas conclusiones:

$$E_v = \frac{N_{seq} p \Omega_s \phi_{pr}}{\sqrt{2}} = 4,44 N_{seq} f_s \phi_{pr}$$

- La tensión de vacío es proporcional a la velocidad de giro y al flujo por polo del rotor.
- El ϕ_{pr} , y por lo tanto E_v , varían con la corriente del rotor (I_r).
- Imponiendo la velocidad de giro la frecuencia queda impuesta independientemente de la carga.

Suponemos ahora la máquina trabajando en régimen permanente, no saturada y conectado el estátor a un sistema trifásico de corrientes equilibradas, éstas crearán un campo magnético giratorio (F_{mms}), de distribución senoidal a lo largo del entrehierro y con una velocidad Ω_s .

Como hemos visto el generador síncrono incluye dos campos magnéticos de distribución espacial senoidal a lo largo del entrehierro, uno generado en el estátor y otro en el rotor. Sí el campo magnético del rotor gira a la velocidad de sincronismo obtenemos una expresión de par:

$$T = p * \frac{L_m}{L_s} * \psi_r * i_s * \sin(\theta)$$

Calculamos la tensión inducida en la fase A (v_A) aplicando la ley de Ohm (convenio generador, R_s resistencia de los devanados del estátor):

$$v_A = -R_s i_A - \frac{d\psi_A}{dt}$$

$$\psi_A = \psi_{Ar} + \psi_{AA} + \psi_{AB} + \psi_{AC} = N_{seq} \phi_{Ar} + (L_{fs} + L_{ms}) i_A + L_{AB} i_B + L_{AC} i_C$$

$$\psi_A = \underbrace{N_{seq} \phi_{Ar}}_{\substack{\text{Flujo del entrehierro} \\ \text{visto por la bobina A}}} + \underbrace{\frac{3}{2} L_{ms} i_A}_{\substack{\text{Flujo magnético} \\ \text{debido al rotor}}} + \underbrace{L_{fs} i_A}_{\substack{\text{Flujo magnético} \\ \text{debido al estator}}} + \underbrace{L_{fs} i_A}_{\substack{\text{Flujo de fugas} \\ \text{de la fase A}}}$$

$$v_A = -R_s i_A - \frac{N_{seq} d\phi_{Ar}}{dt} - \frac{3}{2} \frac{d(L_{ms} i_A)}{dt} - \frac{d(L_{fs} i_A)}{dt}$$

A partir de las ecuaciones anteriores obtenemos el circuito equivalente por fase para régimen permanente de la máquina síncrona.

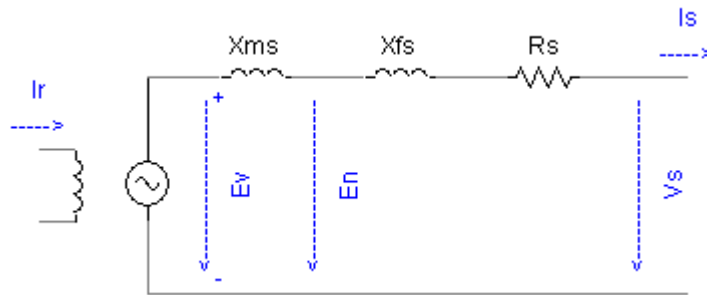


Figura 7. Circuito equivalente por fase de la máquina síncrona.

$$\bar{E}_v = \bar{V}_s + R_s \bar{I}_s + jX_s \bar{I}_s$$

4. Control MADA y Full Converter

En este capítulo se explica el control de ambas topologías con la estrategia en ejes d-q poniéndose de manifiesto las ventajas que proporciona. Esta estrategia se basa en reducir las variables eléctricas trifásicas, en sistema de tres ejes(en el caso que compete a este proyecto), a un sistema de dos ejes giratorios d-q. A este cambio se le denomina transformación de Park que como se verá a continuación viene precedida de la transformación de Clarke que reduce las variables de tres ejes a-b-c a dos ejes estáticos α - β .

4.1 Transformaciones de Clarke y Park

Las ecuaciones de tensión que describen el funcionamiento de las máquinas eléctricas asíncronas y síncronas presentan inductancias que son función de la velocidad del rotor, esto implica que las ecuaciones diferenciales de las tensiones presenten coeficientes variables en el tiempo, dichas ecuaciones explican el comportamiento instantáneo de las máquinas y ello las hace necesarias para explicar el comportamiento transitorio. Para tratar estas ecuaciones se plantean las transformaciones de Clarke y Park que refieren las variables de la máquina a un sistema de coordenadas giratorio.

La transformación de Clarke transforma las variables eléctricas de un sistema trifásico de fases a - b - c en otras α - β - 0 que representan un sistema bidimensional de coordenadas fijo, geométricamente supone la proyección de los tres ejes trifásicos a - b - c sobre dos ejes α - β . La componente nula es cero en el caso de máquinas eléctricas.

Transformada de Clarke:

$$\begin{pmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix}$$

$K = \sqrt{2/3}$: Transformación invariante en potencia (convenio europeo)

$K = 2/3$: Transformación invariante en tensión (convenio americano)

Esta transformación no resuelve el problema de las inductancias variables en el tiempo que aparece cuando el rotor gira debido a que este se encuentra en un sistema de ejes giratorio, por ello es necesario realizar una segunda transformación de ejes fijos α - β -0 a un sistema de ejes rotatorio d - q -0 manteniendo la misma componente nula. La transformación completa desde el sistema de coordenadas a - b - c hasta el d - q -0 se conoce como transformación de Park.

Transformación de Park:

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix}$$

Tanto las variables en d - q -0 como en α - β -0 pueden transformarse en a - b - c aplicando las transformadas inversas correspondientes, utilizando matrices inversas.

4.2 PLL

Para realizar las transformaciones de Park se necesita conocer el ángulo, es decir la posición de los ejes dq. En los sistemas estudiados se utilizará una PLL para el cálculo del ángulo de las variables de red y conocer así la posición de los ejes dq, sabiendo que se desea alinear uno de los ejes con el vector tensión. Se calculará este ángulo en función de las tensiones, para ello se implementa el siguiente control:

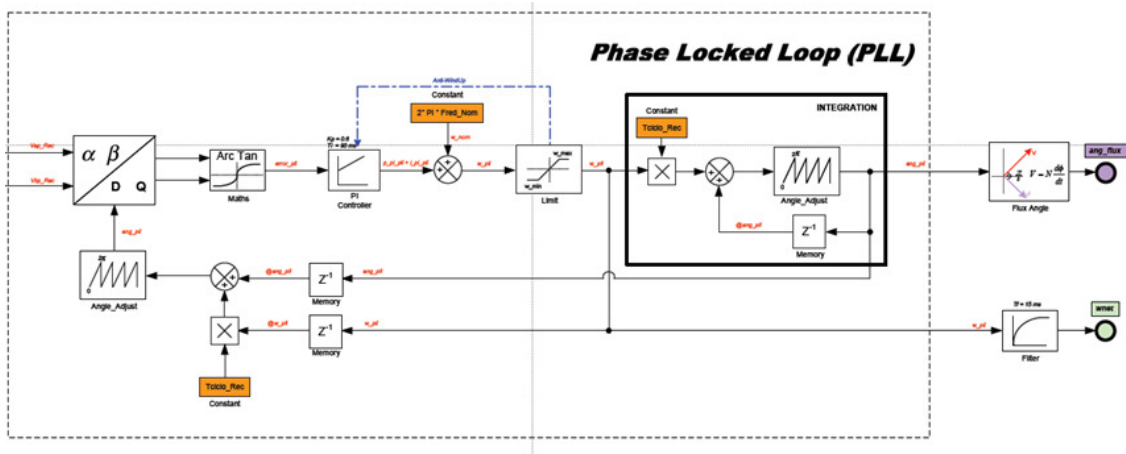


Figura 8. Implementación de la PLL

A partir de la medición de la tensión, con un ángulo inicial se calculan sus componentes en d y en q , se usa el arcotangente para averiguar el error (habrá error

siempre que sea distinto de cero), a través de feedforwards y Pis se trata el error para conseguir reducirlo al mínimo, teniendo a la salida del control la posición en forma de ángulo.

4.3 Control de la MADA

En este apartado se muestra como controlar la topología con maquina asíncrona doblemente alimentada utilizando la transformación de Park. Se explican los lazos de control utilizados y como adecuar el generador y las variables necesarias.

4.3.1 Modelización de la MADA

La evolución de las variables eléctricas de la MADA puede analizarse a partir de sus ecuaciones, en convenio motor para ambos bobinados, referidas a los ejes dq , que giran a la velocidad de sincronismo:

$$\begin{aligned}v_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \psi_{qs} \\v_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} - \omega_s \psi_{ds} \\v_{dr} &= R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \psi_{qr} \\v_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \psi_{dr}\end{aligned}$$

$$\psi_{ds} = L_s * i_{ds} + L_{sr} * i_{dr}$$

$$\psi_{qs} = L_s * i_{qs} + L_{sr} * i_{qr}$$

$$\psi_{dr} = L_r * i_{dr} + L_{sr} * i_{ds}$$

$$\psi_{qr} = L_r * i_{qr} + L_{sr} * i_{qs}$$

La expresión del par electromagnético (T_{em}) en función del flujo del estátor y la corriente del rotor:

$$T_{em} = p \frac{L_{sr}}{L_s} (i_{dr} \psi_{qs} - i_{qr} \psi_{ds})$$

La ecuación mecánica se expresa como:

$$T_{eol} + T_{em} = f * \Omega_m + J \frac{d\Omega_m}{dt}$$

Escogiendo los ejes dq ligados al campo magnético estatórico y haciendo coincidir el eje d con el flujo estatórico (ψ_s) se tiene:

$$\psi_{ds} = \psi_s \longrightarrow \psi_{qs} = 0$$

\Downarrow

$$T_{em} = -p \frac{L_{sr}}{L_s} i_{qr} \psi_{ds}$$

Al estar conectado el estátor a la red eléctrica (fuente de tensión estable), la elección del sistema de referencia hace que el par, y por lo tanto la potencia activa, únicamente dependa de la corriente rotórica del eje q: i_{qr} .

En los ejes a, b, c la tensión en bornes de la máquina es igual a:

$$v_{abcs} = R_s \cdot i_{abcs} + \frac{d\psi_{abcs}}{dt}$$

Despreciando la caída de tensión en las resistencias (válido para media y gran potencia):

$$v_{abcs} = \frac{d\psi_{abcs}}{dt}$$

El vector de tensión de estátor se encuentra adelantado $\pi/2$ con respecto del vector flujo, es decir, sincronizado con el eje q ($V_{ds}=0$ y $V_{qs}=V_s$). Teniendo en cuenta estas relaciones, suponiendo la tensión de red constante y despreciando la influencia de las resistencias:

$$\begin{aligned} v_{ds} &= 0 \\ v_{qs} &= v_s = \omega_s \psi_{ds} \end{aligned} \quad \text{y} \quad \begin{aligned} \psi_{ds} &= \psi_s = L_s i_{ds} + L_{sr} i_{dr} \\ 0 &= L_s i_{qs} + L_{sr} i_{qr} \end{aligned}$$

A partir de estas ecuaciones se pueden ligar las corrientes de estátor y del rotor:

$$i_{ds} = \frac{\psi_s}{L_s} - \frac{L_{sr}}{L_s} i_{dr} \quad ; \quad i_{qs} = -\frac{L_{sr}}{L_s} i_{qr}$$

Relación entre las potencias activa y reactiva del estátor y las corrientes rotóricas:

$$\begin{aligned} P_s &= v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \\ Q_s &= v_{qs} i_{ds} + v_{ds} i_{qs} \end{aligned} \xrightarrow{v_{ds}=0} \begin{aligned} P_s &= v_{qs} i_{qs} = -v_s \frac{L_{sr}}{L_s} i_{qr} \\ P_s &= v_{qs} i_{ds} = \frac{v_s \psi_s}{L_s} - \frac{v_s L_{sr}}{L_s} i_{dr} \end{aligned} \xrightarrow{\psi_s \approx \frac{v_s}{\omega_s}} \begin{aligned} P_s &= -v_s \frac{L_{sr}}{L_s} i_{qr} \\ Q_s &= \frac{v_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{v_s L_{sr}}{L_s} i_{dr} \end{aligned}$$

Con el sistema de referencia elegido, suponiendo las inductancias constantes (no saturación), las potencias activa y reactiva del estátor varían de forma proporcional a las corrientes i_{qr} e i_{dr} , respectivamente.

Relación entre las tensiones y corrientes rotóricas:

$$\begin{aligned} v_{dr} &= R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \psi_{qr} \\ v_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \psi_{dr} \end{aligned} \quad \begin{cases} \psi_{dr} = L_{sr} i_{ds} + L_r i_{dr} \\ \psi_{qr} = L_{sr} i_{qs} + L_r i_{qr} \end{cases} \quad \begin{cases} i_{ds} = \frac{\psi_s}{L_s} - \frac{L_{sr}}{L_s} i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{L_{sr}}{L_s} i_{qr} \end{cases}$$

A partir de estas ecuaciones:

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + \left(L_r - \frac{L_{sr}^2}{L_s} \right) \frac{di_{dr}}{dt} - s \omega_s \left(L_r - \frac{L_{sr}^2}{L_s} \right) i_{qr}$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \left(L_r - \frac{L_{sr}^2}{L_s} \right) \frac{di_{qr}}{dt} - s \omega_s \left(L_r - \frac{L_{sr}^2}{L_s} \right) i_{dr} + s \omega_s \left(\frac{L_{sr} v_s}{\omega_s L_s} \right)$$

Para el control de ambas corrientes quedan funciones de transferencia de 1º orden, por lo que se puede implementar un control similar al visto para el inversor de red. En los lazos de control se pueden añadir compensaciones para eliminar el acoplamiento existente entre las corrientes así como la perturbación sobre i_{qr} .

Ecuaciones que relacionan las potencias de estator con las corrientes de rotor.

$$\begin{aligned} P_s &= -v_s \frac{L_{sr}}{L_s} i_{qr} \\ Q_s &= \frac{v_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{v_s L_{sr}}{L_s} i_{dr} \end{aligned}$$

Con estas dos ecuaciones y sabiendo que L_{sr} es la inductancia de magnetización y los términos con subíndice s son de estator y los que términos con subíndice r son de rotor, podemos conocer que dos corrientes en d y q hay que inyectar para sacar por estator cierta potencia activa y reactiva.

Ecuaciones que relacionan las tensiones y corrientes rotóricas.

$$\begin{aligned} v_{dr} &= R_r i_{dr} + \frac{d\Psi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \Psi_{qr} \\ v_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{d\Psi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \Psi_{dr} \end{aligned} \left\{ \begin{aligned} \Psi_{dr} &= L_{sr} i_{ds} + L_r i_{dr} \\ \Psi_{qr} &= L_{sr} i_{qs} + L_r i_{qr} \end{aligned} \right. \left\{ \begin{aligned} i_{ds} &= \frac{\Psi_s}{L_s} - \frac{L_{sr}}{L_s} i_{dr} \\ i_{qs} &= -\frac{L_{sr}}{L_s} i_{qr} \end{aligned} \right.$$

A partir de estas ecuaciones:

$$\begin{aligned} v_{dr} &= R_r i_{dr} + \left(L_r - \frac{L_{sr}^2}{L_s} \right) \frac{di_{dr}}{dt} - s \omega_s \left(L_r - \frac{L_{sr}^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ v_{qr} &= R_r i_{qr} + \left(L_r - \frac{L_{sr}^2}{L_s} \right) \frac{di_{qr}}{dt} - s \omega_s \left(L_r - \frac{L_{sr}^2}{L_s} \right) i_{dr} + s \omega_s \frac{L_{sr} v_s}{\omega_s L_s} \end{aligned}$$

4.3.2 Cálculo de los ángulos necesarios para la transformación de Park

Si las tensiones del estátor son estables, el ángulo θ_s , necesario para transformar las variables del estátor, se puede obtener directamente a partir de dichas tensiones con el uso de una PLL. Se debe tener en cuenta que eje d se retrasa un ángulo igual a $\pi/2$ con respecto al vector tensión (flujo alineado con el eje d).

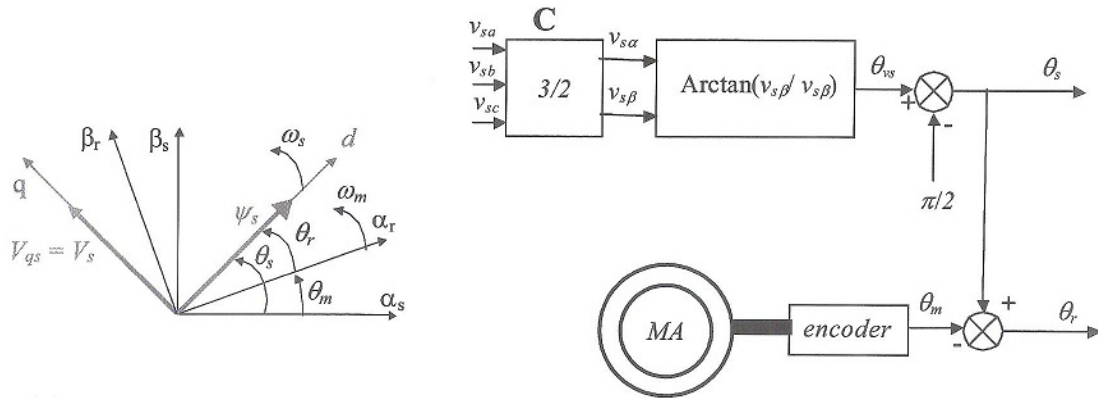


Figura 9. Ángulos para transformaciones.

Por otra parte el ángulo necesario para la transformación de las variables del rotor θ_r se puede obtener midiendo o estimando la posición del rotor con respecto al estátor θ_m y restando este ángulo al del estátor.

4.3.3 Sistema de conversión

El sistema de conversión consta, como ya hemos comentado, de dos convertidores, lado red y lado máquina, y de un bus de continua. Cada uno de ellos tiene un cometido distinto y por lo tanto su propio control.

4.3.3.1 Convertidor lado red

Su función principal es controlar y mantener la tensión de bus de continua constante, para ello implementamos el siguiente control:

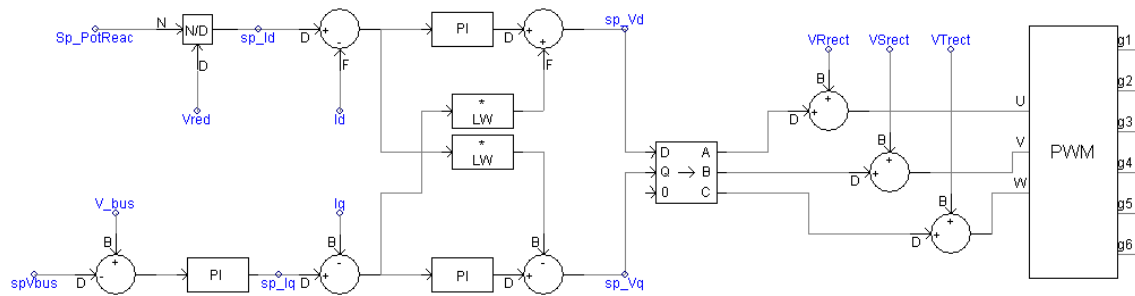


Figura 10. Lazos de control de convertidor lado red

El objetivo de los lazos de control es conseguir la tensión deseada a la salida del convertidor para que las variables eléctricas correspondientes sigan su referencia.

En este caso partimos de unas consignas de potencia activa y reactiva, la primera se obtiene a partir de comparar una consigna de tensión de bus y su medida y la segunda es el valor que corresponda en cada caso (normalmente cero), una vez tenemos las consignas de potencia las dividimos entre la tensión de red (en ejes $d-q$) y calculamos las consignas de corriente, comparamos éstas con las corrientes medidas y obtenemos las consignas de tensión que introduciremos al modulador para que origine los disparos de los IGBTs del convertidor.

4.3.3.2 Convertidor lado máquina

Su función principal es regular la tensión y corriente del rotor y controlar el deslizamiento para satisfacer las consignas de potencia en el estátor exigidas por el PLC.

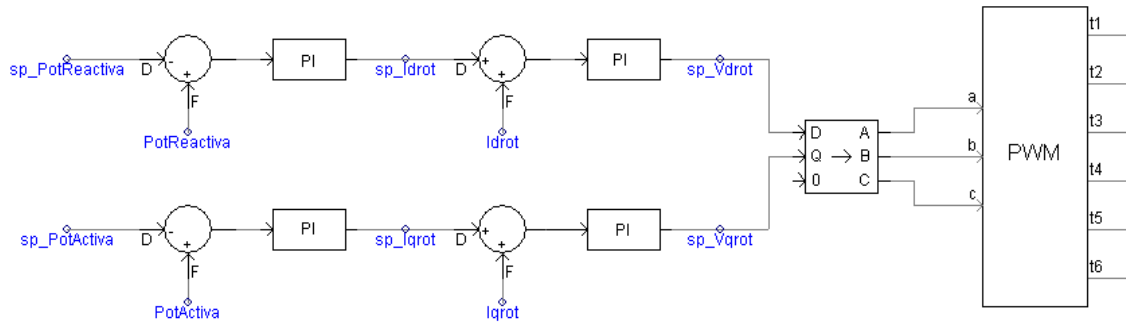


Figura 11. Lazos de control convertidor lado máquina

Los lazos de control tienen el mismo objetivo que para el caso del convertidor lado red. En este caso las consignas de potencia las impone el PLC, comparándolas con su medida tenemos las consignas de corriente del rotor que a su vez las comparamos también con su medida y obtenemos las consignas de tensión que introduciremos al modulador para que origine los disparos de los IGBTs del convertidor.

Hay que tener en cuenta en cada caso si estamos transformando a ejes $d-q$ variables del estátor o del rotor para utilizar correctamente el ángulo de transformación.

4.3.3.3 Bus de continua

Se compone de una serie de condensadores conectados entre el convertidor lado red y el lado máquina. Su función principal es servir como almacén de energía para que el convertidor lado máquina pueda tomar energía de una fuente estable cuando sea necesario. Con el control del nivel de tensión de bus desconectamos el convertidor en caso de sobretensión, es decir nos sirve también como indicador de irregularidades.

4.4 Control Full Converter

4.4.1 Modelización máquina de imanes

Las ecuaciones que rigen el comportamiento de una máquina genérica de imanes permanentes, expresadas en los ejes d-q-0, son las siguientes:

$$\begin{aligned}v_{ds} &= i_{ds} \cdot R_s + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_r \cdot \Psi_q \\v_{qs} &= i_{qs} \cdot R_s + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega_r \cdot \Psi_d \\v_{os} &= i_{os} \cdot R_s + \frac{d\Psi_o}{dt}\end{aligned}$$

Donde ω_r es la velocidad eléctrica de giro del rotor de la máquina.

Las tres ecuaciones expresan la relación entre las tensiones aplicadas en bornes del estátor y las corrientes que circulan por la máquina (en ejes d-q-0).

Las ecuaciones de los flujos son:

$$\begin{aligned}\Psi_d &= (L_{fs} + L_{md}) \cdot i_{ds} + \Psi_{iman} + L_{md} \cdot i_{kd} \\ \Psi_q &= (L_{fs} + L_{mq}) \cdot i_{qs} + L_{mq} \cdot i_{kq}\end{aligned}$$

Normalmente, las máquinas de imanes permanentes no se conectan a la red directamente, sino que lo hacen a través de un convertidor electrónico, que hace que los transitorios en el estátor estén controlados. Esto hace que las máquinas de imanes permanentes no dispongan de devanados amortiguadores.

Además, por lo general, las máquinas eléctricas rotativas se dejan con neutro aislado, por lo que las corrientes en el eje 0 serán nulas en todo momento pudiendo eliminar dicha ecuación.

Aplicando las simplificaciones mencionadas anteriormente y denominando $L_d = L_{fs} + L_{md}$ y $L_q = L_{fs} + L_{mq}$ las ecuaciones que rigen el comportamiento de la máquina de imanes permanentes son:

$$v_{ds} = i_{ds} \cdot R_s + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_r \cdot \Psi_q$$

$$v_{qs} = i_{qs} \cdot R_s + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega_r \cdot \Psi_d$$

$$\Psi_d = L_d \cdot i_{ds} + \Psi_{iman}$$

$$\Psi_q = L_q \cdot i_{qs}$$

Resulta conveniente separar el flujo total (Ψ) en sus dos componentes, el flujo creado por el rotor (Ψ_{iman}) y el flujo creado por el estátor o reacción de inducido (Ψ_s).

Expresando las ecuaciones en forma matricial resultan:

$$[V] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt}[\Psi] + [\omega_r] \cdot [\Psi]$$

Separando ahora la matriz de flujos en la matriz de flujo del rotor y la del estátor:

$$[V] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt}[\Psi_{iman} + \Psi_s] + [\omega_r] \cdot [\Psi_{iman} + \Psi_s]$$

Donde:

$$[V] = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix}$$

$$[i_s] = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$[\Psi_{iman}] = \begin{bmatrix} \Psi_{iman} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$[\Psi_s] = [L] \cdot [i_s] = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix}$$

$$[\omega_r] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_r \\ \omega_r & 0 \end{bmatrix}$$

Si se considera el flujo del imán constante en todo el rango de funcionamiento de la máquina, y tomando el flujo del estátor como variable de estado:

$$\frac{d}{dt}[\Psi_s] = [V] - ([R_s] \cdot [L]^{-1} + [\omega_r]) \cdot [\Psi_s] - [\omega_r] \cdot [\Psi_{iman}]$$

Resultando las siguientes ecuaciones en flujos:

$$\frac{d}{dt} \Psi_{sd} = v_{ds} - \frac{R_s}{L_d} \cdot \Psi_{sd} + \omega_r \cdot \Psi_{sq}$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{sq} = v_{qs} - \frac{R_s}{L_q} \cdot \Psi_{sq} - \omega_r \cdot (\Psi_{sd} + \Psi_{iman})$$

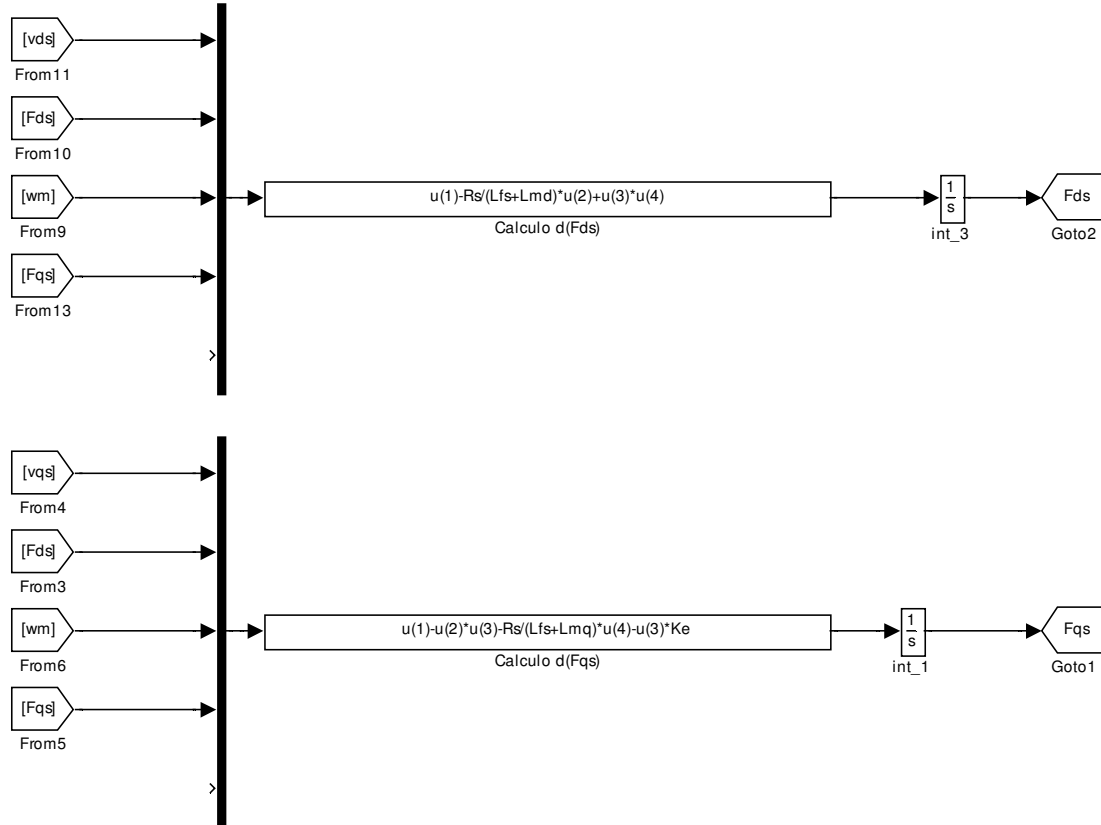


Figura 12. Implementación de las ecuaciones de flujo

Las dos ecuaciones resultantes pueden implementarse en Simulink de manera sencilla como se muestra en la figura superior. Los valores de inicialización de los bloques integrales deben ser calculados en función de las corrientes estáticas iniciales.

Una vez obtenido el flujo del estátor, la corriente que circula por éste se puede obtener mediante el inverso de la matriz de inductancias resultando:

$$i_{ds} = \frac{\Psi_{sd}}{L_d}$$

$$i_{qs} = \frac{\Psi_{sq}}{L_q}$$

Con la corriente que circula por el estátor de la máquina, la potencia eléctrica introducida en la máquina se calcula:

$$P_s = v_{ds} \cdot i_{ds} + v_{qs} \cdot i_{qs}$$

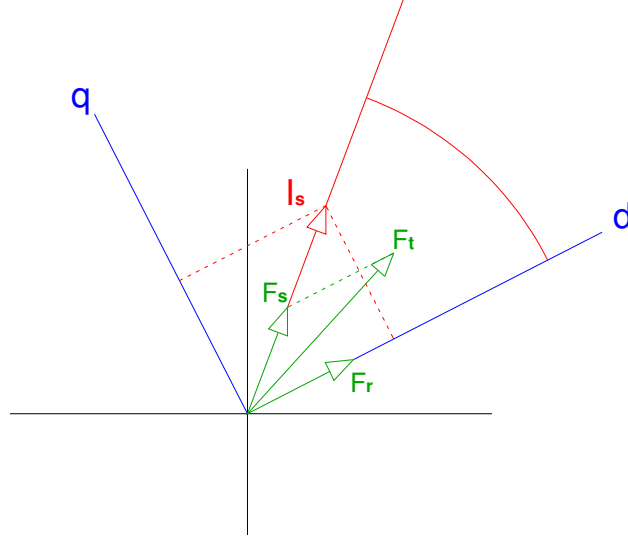


Figura 13. Diagrama vectorial

A partir de esta ecuación, se obtendrá la expresión del par electromagnético realizado por la máquina. Para ello, se sustituye v_{ds} y v_{qs} por el voltaje de velocidad en el eje d y q respectivamente de forma que la ecuación queda:

$$\begin{aligned} V_{ds} &= -\omega_r \cdot \Psi_q \\ V_{qs} &= \omega_r \cdot \Psi_d \\ P_s &= -\omega_r \cdot \Psi_q \cdot i_{ds} + \omega_r \cdot \Psi_d \cdot i_{qs} \end{aligned}$$

Dividiendo la expresión de la potencia entre la velocidad angular mecánica del rotor, se obtiene la expresión del par en el eje:

$$T = \frac{P_s}{\Omega_m} = p \cdot (-\Psi_q \cdot i_{ds} + \Psi_d \cdot i_{qs}) = p \cdot (\Psi_{iman} \cdot i_{qs} + (L_d - L_q) \cdot i_{ds} \cdot i_{qs})$$

En esta expresión se observa como el par realizado por la máquina de imanes permanentes tiene un término directamente dependiente de la corriente del estátor en el eje q y otro que depende de la diferencia entre las inductancias de los ejes d y q (asimetría en la reluctancia del circuito magnético de la máquina).

4.4.2 Sistema de conversión

En este caso el sistema de conversión está compuesto al igual que en la MADA de dos convertidores, lado máquina y lado red y de un bus de continua. Cada elemento del sistema tiene su propia función.

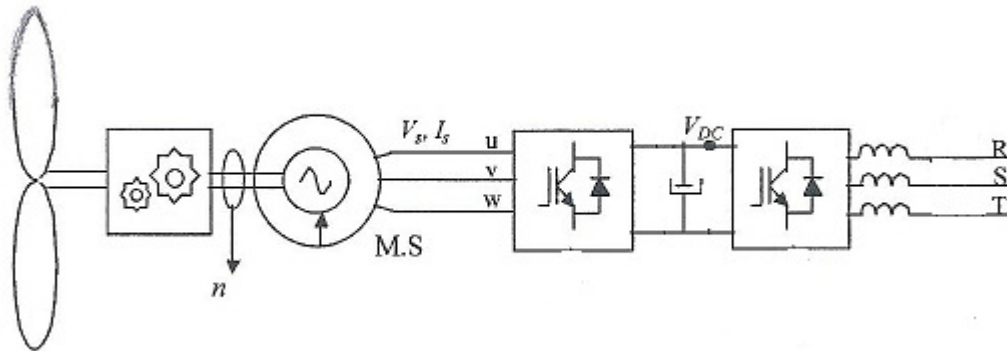


Figura 14. Sistema de conversión topología full converter.

4.4.2.1 Convertidor lado red

Su función es mantener constante y controlar la tensión del bus de continua, para ello implementamos un control similar al de la MADA.

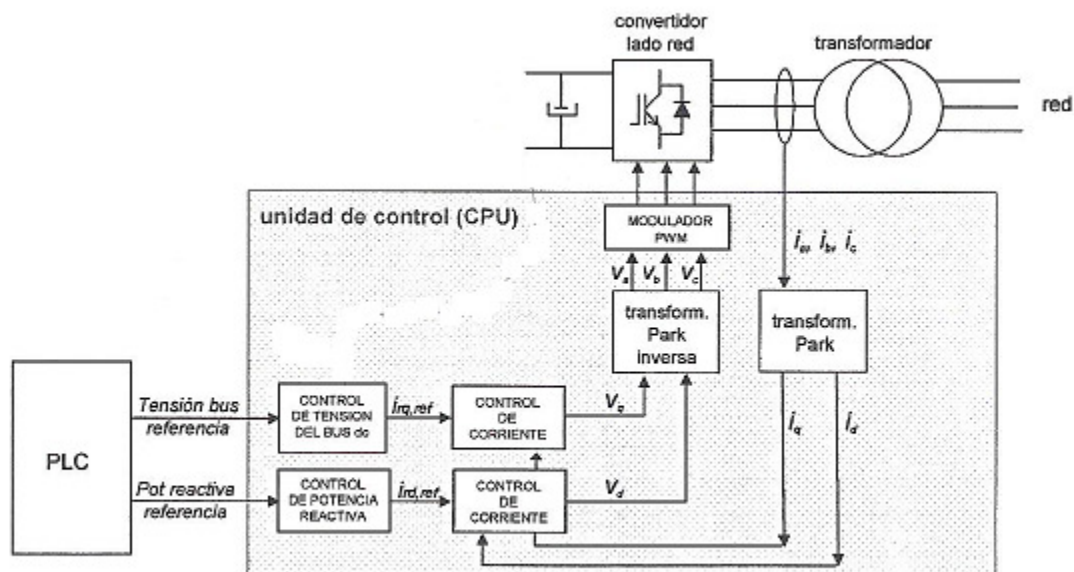


Figura 15. Lazos de control de convertidor lado red

4.4.2.2 Convertidor lado máquina

Este convertidor se encarga del control de par de la máquina, en definitiva de la potencia y del control de la tensión de estátor. Para implementar el control utilizaremos dos lazos en ejes d - q , éstos girarán a la velocidad del rotor así que el ángulo a utilizar en las transformaciones será el del rotor θ_m que lo medimos con el encoder.

Alineamos el eje d con el flujo del rotor. Podemos controlar el par actuando sobre la corriente del estátor, más concretamente sobre la corriente de cuadratura i_{sq} que es la que crea par, ya que la corriente directa i_{sd} está en la dirección del flujo y no crea par, podemos dejar ésta a cero, así tenemos menos pérdidas, pero la utilizaremos para controlar la tensión de estátor, si subimos su valor bajamos la tensión, esto nos interesa para que el convertidor no entre en saturación.

Una vez claro el objetivo implementamos los lazos para el caso de una máquina de imanes permanentes, por una parte el PLC nos da la consigna de potencia, ésta la dividimos entre la velocidad mecánica de giro del rotor y obtenemos la consigna de par que a través de su expresión nos proporciona la corriente de referencia $i_{sq,ref}$ necesaria para cumplir la consigna de potencia, comparamos ésta con la corriente medida y obtenemos la consigna de tensión V_q . Por otra parte a partir de la tensión del estátor obtenemos la corriente de referencia $i_{sd,ref}$ necesaria en cada momento, la comparamos con su medida y obtenemos la consigna de tensión V_d . Tanto V_q como V_d las introducimos al modulador para que origine los disparos de los IGBTs del convertidor.

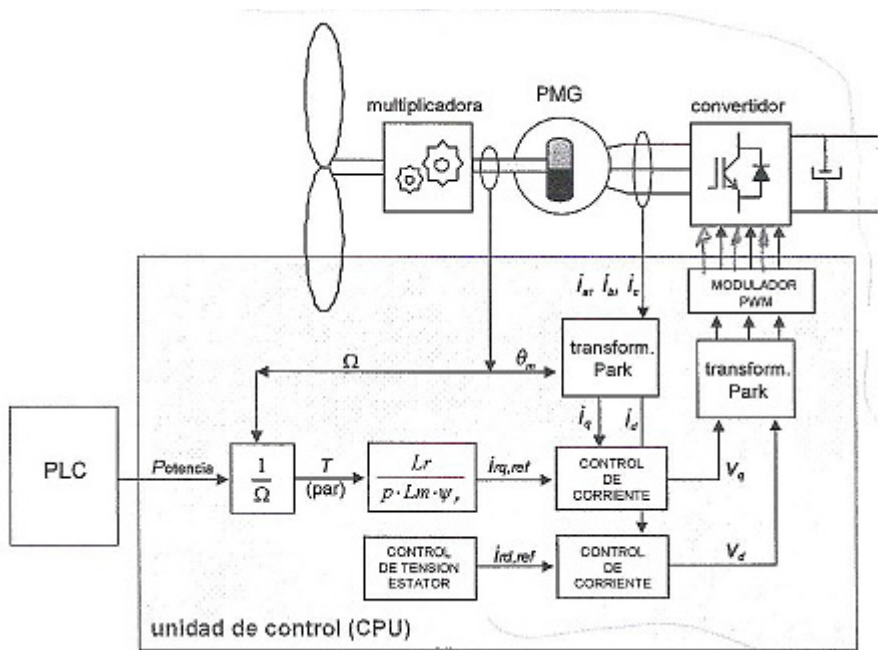


Figura 16. Control lado máquina PMG.

Si tenemos una máquina de excitación con este convertidor controlaremos la corriente de excitación de la máquina a partir de la consigna de potencia.

4.4.2.3 Bus de continua

Se compone de una serie de condensadores conectados entre el convertidor lado red y el lado máquina. Su función principal es servir como almacén de energía para que el convertidor lado máquina pueda tomar energía de una fuente estable cuando sea necesario. Con el control del nivel de tensión de bus desconectamos el convertidor en caso de sobretensión, es decir nos sirve también como indicador de irregularidades.

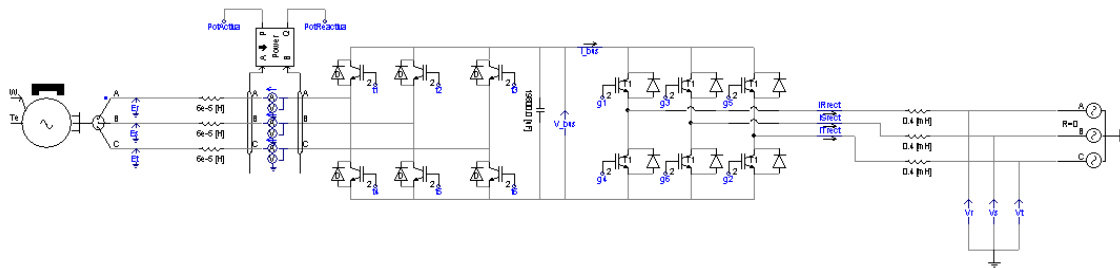


Figura 17. Esquema general full converter.

4.5 Cálculo de los parámetros de los PI

Tras plasmar los lazos de control de los convertidores back-to-back para aplicación eólica con máquina doblemente alimentada y full converter se expone la forma de calcular los parámetros de los diferentes reguladores, que en este caso son PIs. En paralelo se muestra el software para la obtención de los bodes de los lazos de control. Se utiliza Matlab y sus herramientas para realizar dicho proceso.

A partir de los esquemas vistos en el capítulo 3, tanto de la doblemente alimentada como de la full converter, se obtienen los modelos monofásicos que se utilizan para realizar el estudio del sistema y obtener en su punto final los parámetros de los reguladores PI de los lazos de control.

Una vez obtenidos los modelos se implementan en Simpower, a continuación se observan los modelos tanto de la máquina doblemente alimentada como de la full converter:

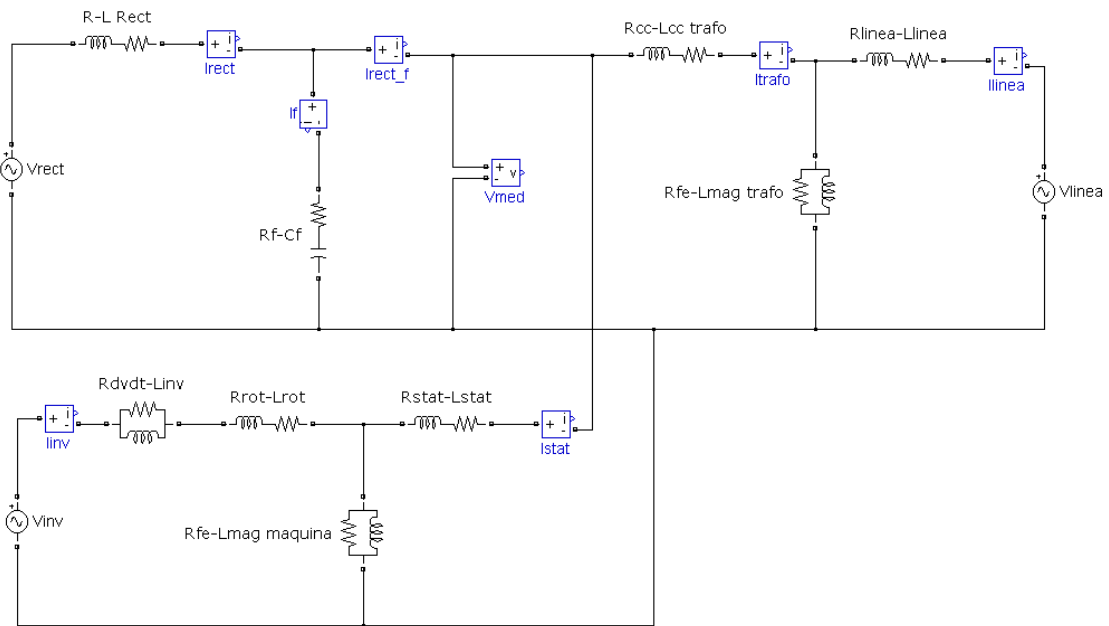


Figura 18. Modelo monofásico de la máquina asíncrona doblemente alimentada

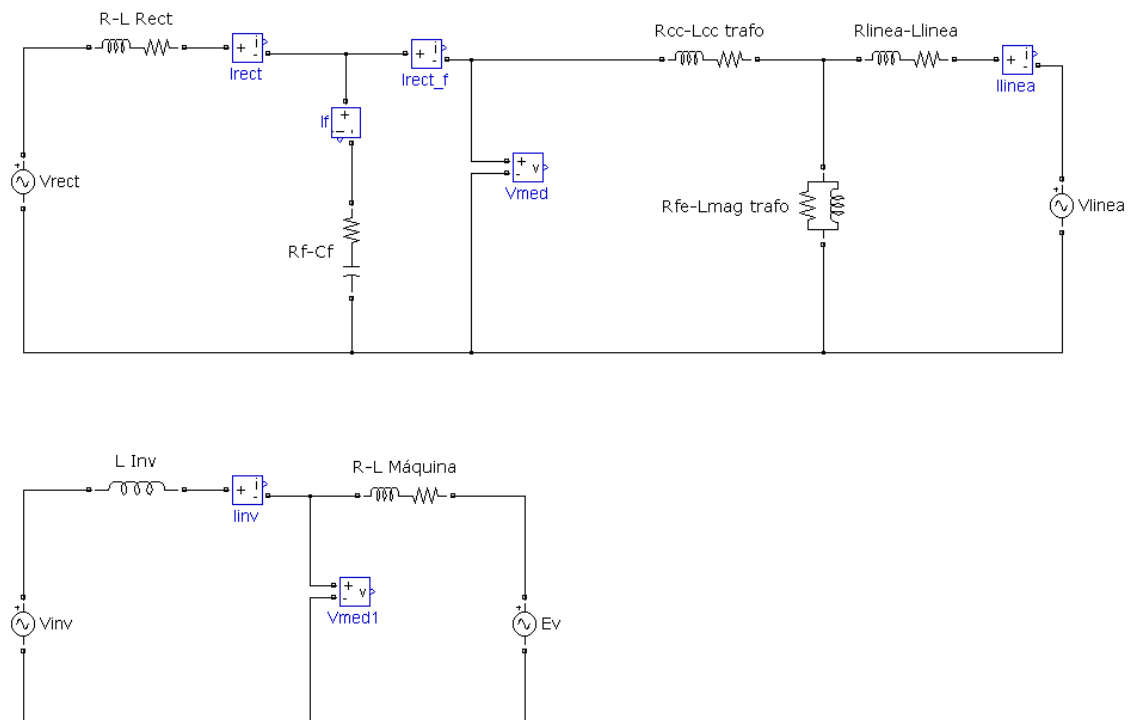


Figura 19. Modelo monofásico de full converter

Se obtiene el espacio de estados del sistema completo de los modelos aplicando la función “power_analyze” de Matlab, hay que tener en cuenta que antes de aplicar dicha función es necesario aplicar los parámetros correspondientes en las impedancias de los modelos. A partir de aquí resulta sencillo extraer las funciones de transferencia necesarias para el análisis del sistema, que es el primer paso para el estudio en cuestión.

Seguidamente se explica cómo calcular los parámetros de los PI para el caso de la máquina doblemente alimentada teniendo en cuenta que el proceso es de la misma manera para el caso de la full converter, con la diferencia de que se obtiene el espacio de estados según el modelo que se plantee y se extraen las funciones de transferencia necesarias para cada caso.

4.5.1 Convertidor lado red

Se puede exponer de forma simplificada la función de transferencia de la planta del lazo de corriente:

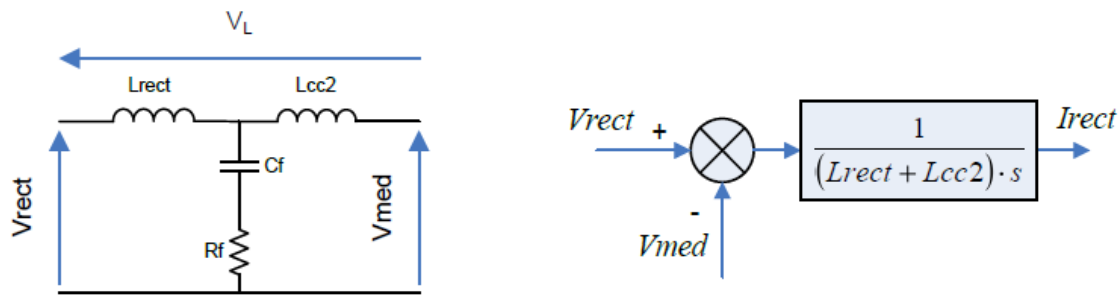


Figura 20. Planta simplificada del controlador de corriente del lado red.

En la función de transferencia plasmada se desprecia el condensador ya que éste no tiene efecto en el ancho de banda del lazo de corriente. Esto es así, claro está, si se ha diseñado el filtro de forma correcta fijando su frecuencia característica ZLC por encima del ancho de banda del control.

Cabe destacar que esta FT se ha reducido para facilitar la explicación, ya que en el cálculo de todas las funciones de transferencia mediante SimPower y su posterior análisis en matlab no se realiza ninguna simplificación de este tipo, ya que se analiza el modelo completo.

Partiendo de esta función de transferencia se compensa la tensión V_{med} sumándola a la salida del regulador. De esta forma el regulador debe proporcionar únicamente la tensión que cae en la bobina, V_L y no la tensión total V_{rect} .

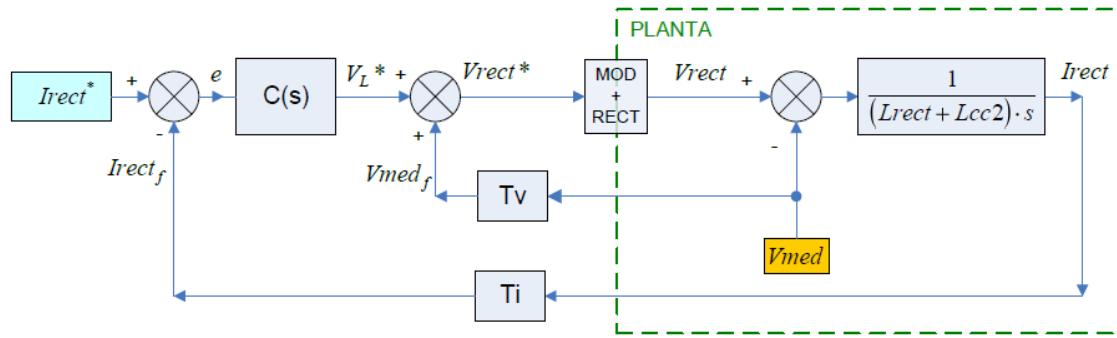


Figura 21. Lazo de control de corriente de convertidor lado red.

El controlador empleado para todos los lazos implementados es un PI típico de la forma:

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_n \cdot s} \right) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right)$$

El lazo de control que se implementa en matlab está representado en la siguiente figura. En él se genera la tensión que se quiere compensar V_{med} a partir de la corriente de salida I_{rect}' .

Hay que tener en cuenta las diferentes relaciones de transformación (rtt) para la realización de los lazos de control. Se señalan como variables con comilla aquellas que han sido modificadas con una relación de transformación.

Mediante SimPower obtenemos las funciones de transferencia I_{rect}' / V_{rect}' y del modelo completo V_{med} / I_{rect}' .

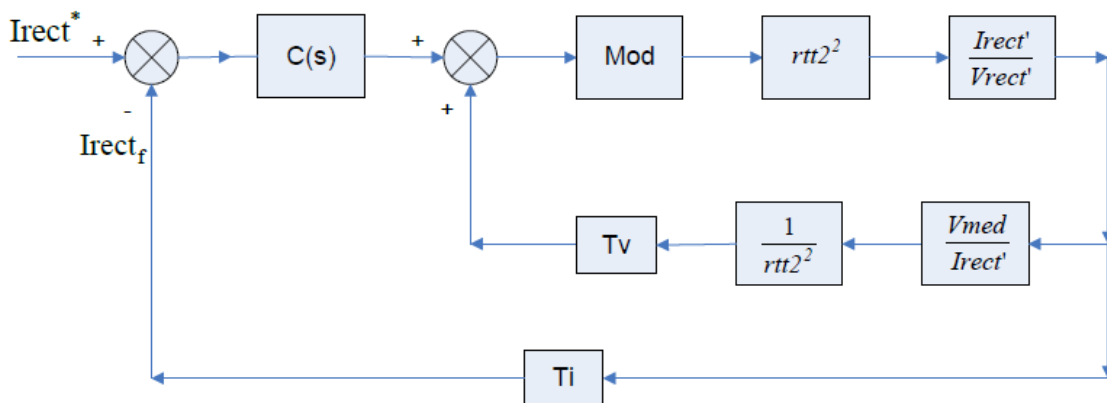


Figura 22. Lazo de control corriente lado red implementado en matlab.

Una vez realizado el lazo de corriente de rectificador, se analiza el lazo de tensión de bus.

Recordamos que la relación entre la potencia del bus y la tensión del condensador de bus viene dada por la siguiente función de transferencia:

$$\frac{V_{bus}^2}{P_{bus}} = \frac{2}{C_{bus} \cdot s}$$

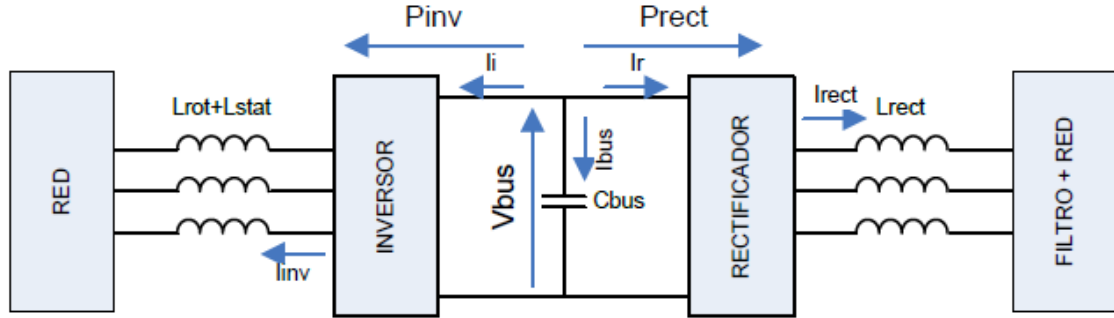


Figura 23. Conversión de signos para la obtención de la potencia de bus

Según este esquema tenemos que $P_{rect} = V_{bus} I_r = \sqrt{3} V_{red} I_{rect} \cos \varphi$, suponiendo factor de potencia unitario y conociendo las relaciones entre las intensidades I_i , I_r e I_{bus} , cuya suma es igual a cero se llega a:

$$V_{bus}^2 = - \frac{P_{inv} + \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V_{red} \cdot \hat{I}_{rect}}{C_{bus}/2 \cdot s}$$

A partir de este cálculo se implementa el siguiente lazo de control de tensión:

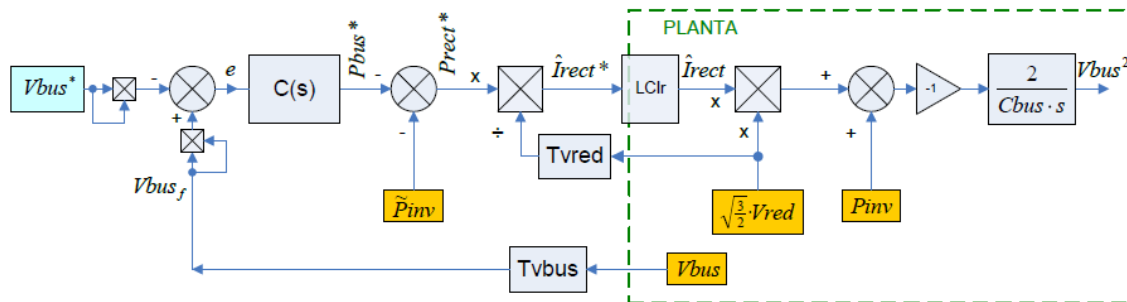


Figura 24. Lazo de control de tensión de bus de convertidor lado red.

Siendo:

Tvred: Filtro de medida de tensión de red.

Tvbus: Filtro de medida de tensión de bus.

LCIr: Lazo de control de corriente.

C(s): Regulador PI.

Una vez conocidos los lazos de control del sistema se presenta una técnica para el cálculo de los parámetros de los reguladores con la cual se obtiene un buen compromiso entre rapidez y estabilidad.

Se definen algunas especificaciones del sistema:

Ancho de banda: Frecuencia de corte del lazo cerrado (f_c) o frecuencia de corte angular $\omega_c = 2\pi \cdot f_c$.

Margen de fase : Para asegurar la estabilidad del sistema sin limitar excesivamente su dinámica, el margen de fase suele tomarse entre 45° - 60° . En caso de sistemas con incertidumbre sobre los valores de sus componentes se aconseja tomar al menos 60° .

Se elige la frecuencia de corte de los lazos teniendo en cuenta que el lazo interno de corriente debe ser más rápido que el externo de tensión para que el sistema se coordine, en nuestro caso unas 10 veces más rápido, para la elección de dichas frecuencias se debe tener en cuenta también que se alejen de la frecuencia de conmutación para no tener pérdida de información.

Teniendo fijada la frecuencia de corte de los lazos, se elige el margen de fase (MF) deseado y a partir de estas especificaciones calculamos los parámetros K_p y T_n de los reguladores. En vez de elegir el MF al azar se aprovecha el software de matlab para crear un gráfico, teniendo como entrada diferentes puntos del MF, en una banda lógica, y calculando los K_p y T_n correspondientes.

El software sigue el siguiente criterio:

Se fija la frecuencia de corte (ω_c) y para cada margen de fase (MF) se calcula el parámetro T_n a partir de la fase de la función de transferencia en lazo abierto (FLA(s)) de la siguiente manera:

$$\varphi[FLA(j\omega_c)] = -180 + MF \rightarrow MF = \tan^{-1}(T_n \omega_c) - \tan^{-1}(\tau_{sc} \omega_c)$$

Una vez obtenido T_n la ganancia K_p se obtiene a partir de la ganancia unitaria de FLA(jw) a la frecuencia de corte:

$$|FLA(j\omega_c)| = 1 \rightarrow \frac{K_p A_{cel} K_{sc}}{T_n L \omega_c^2} \sqrt{\frac{T_n^2 \omega_c^2 + 1}{\tau_{sc}^2 \omega_c^2 + 1}} = 1$$

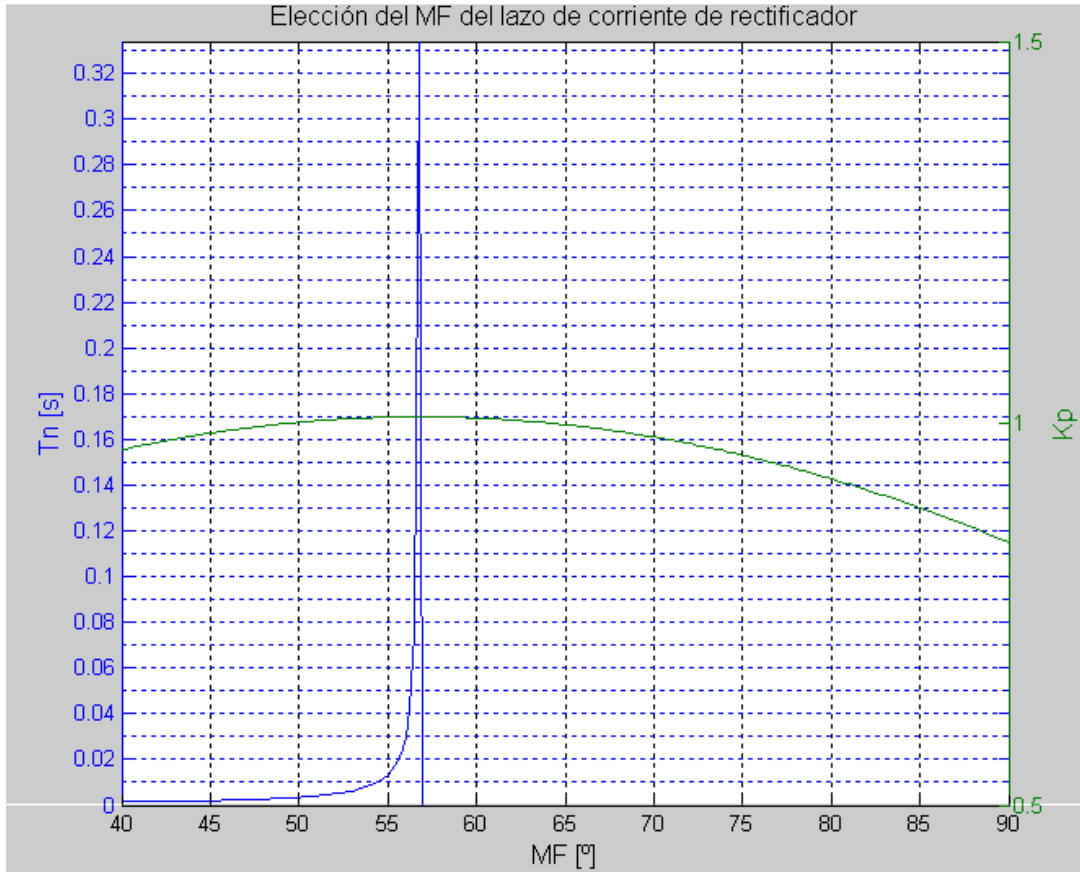


Figura 25. Elección margen de fase del lazo de corriente lado red

Se elige el punto del gráfico que mejor se ajuste al sistema, se puede observar en este caso que a partir de 55° de margen de fase más o menos se tiene que aumentar mucho T_n para conseguir más margen de fase y a su vez el valor de K_p será prácticamente el mismo.

Para la elección del punto se sigue como criterio conseguir el máximo MF, que da estabilidad al sistema, pero sin perder de vista el valor K_p , que le da rapidez. En el gráfico de la figura se selecciona el punto en las cercanías del codo donde se obtiene un valor bueno de MF y también un valor óptimo de K_p .

El proceso se repite para el lazo de la tensión de bus teniendo:

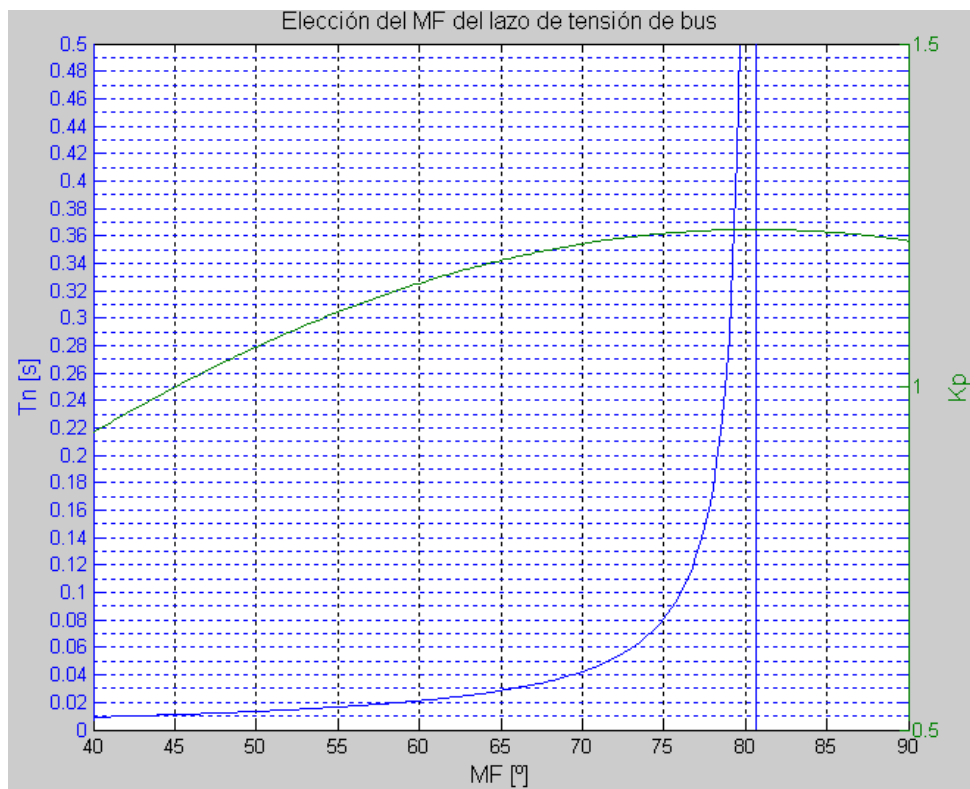


Figura 26. Elección margen de fase del lazo de tensión de bus.

Con los parámetros de los reguladores calculados el software nos ofrece los bodes de los lazos de control, tanto en lazo abierto como en lazo cerrado.

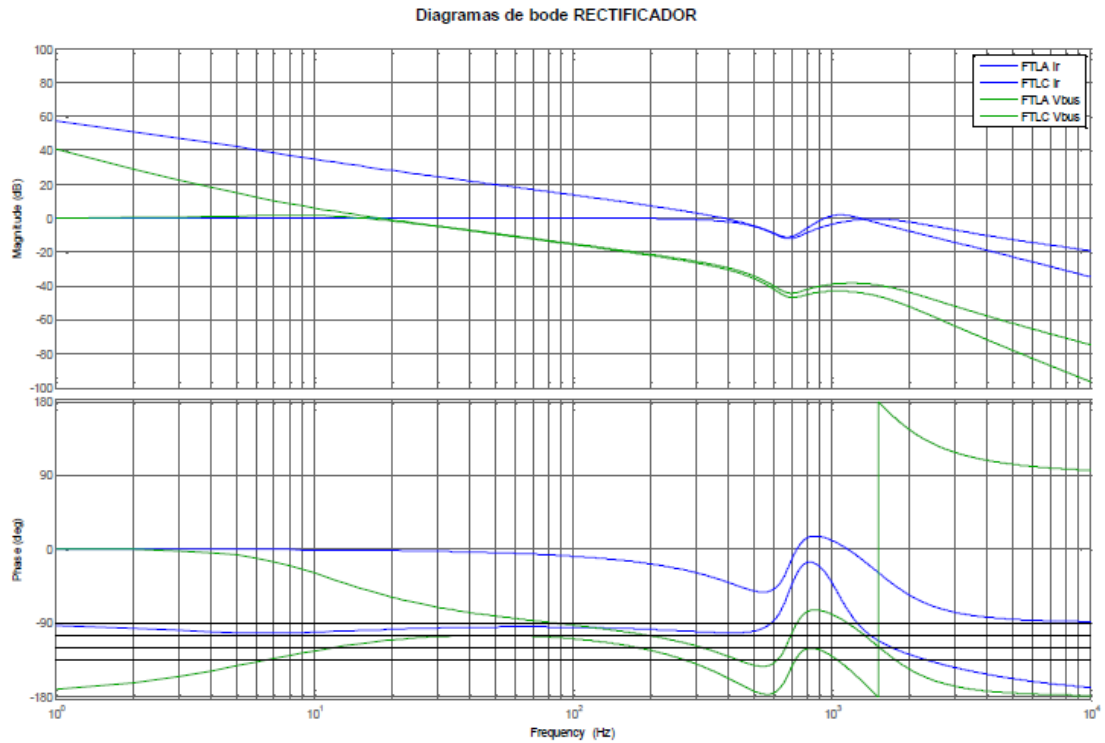


Figura 27. Diagrama de bode lazos de control de convertidor lado red

4.5.2 Convertidor lado máquina

Después de observar la planta del lazo de corriente se simplifica eliminando el filtro dV/dt y las resistencias serie, obteniéndose la siguiente función de transferencia:

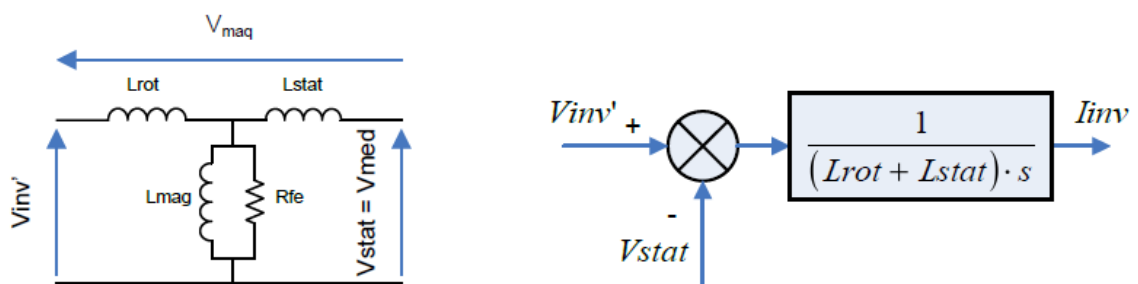


Figura 28. Planta simplificada del controlador de corriente del lado máquina.

Igual que para el caso del lado red se compensa la tensión $Vstat(Vmed)$ sumándola a la salida del regulador. De esta forma el regulador debe proporcionar únicamente la tensión que cae en la bobina $Vmaq$, y no la tensión total $Vinv'$.

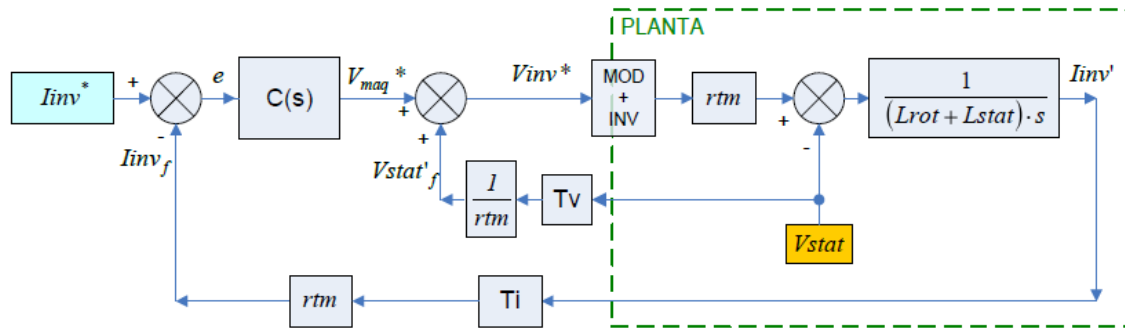


Figura 29. Lazo de control de corriente de convertidor lado máquina.

El lazo de control que se implementa en matlab está representado en la figura siguiente. En él se genera la tensión que se quiere compensar, V_{stat} , a partir de la corriente de salida I_{inv}' .

Mediante SimPower obtenemos las funciones de transferencia I_{inv}'/V_{inv}' y V_{med}'/I_{inv}' del modelo completo.

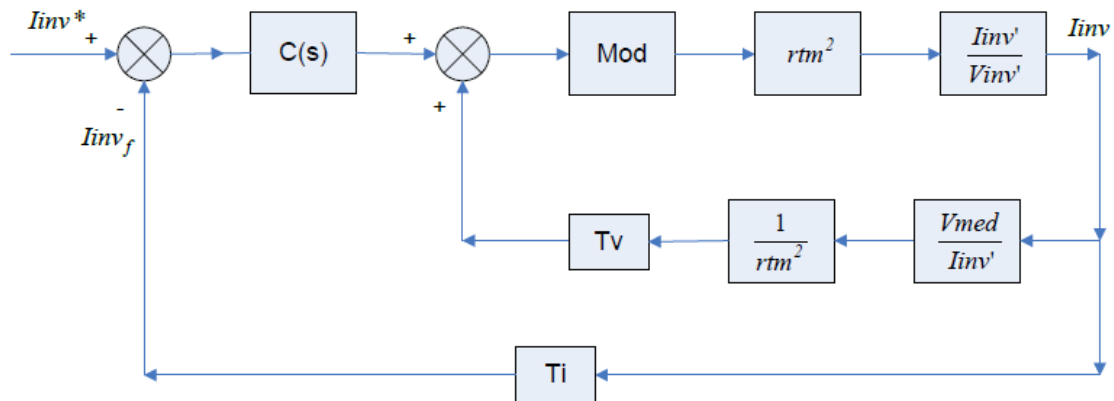


Figura 30. Lazo de control corriente lado máquina implementado en matlab.

Tras el análisis del lazo de corriente del lado máquina pasamos al lazo de potencia.

Sabemos que:

$$S = \sqrt{3} \cdot V_{stat_{rms}} \cdot I_{stat_{rms}}$$

Y como anteriormente se ha generado la corriente del lado máquina, resulta que de forma simplificada, la planta de potencia no es más que la representada en la siguiente figura:

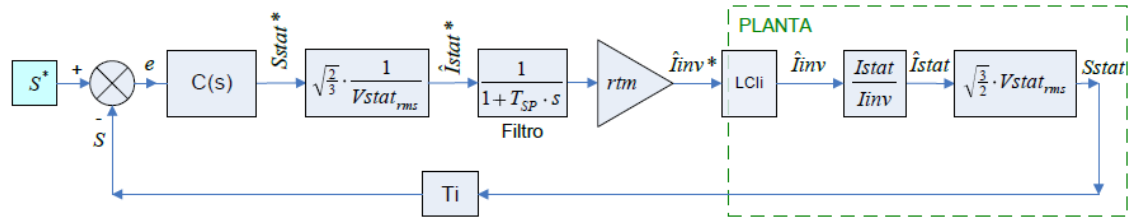


Figura 31. Lazo de control de potencia de convertidor lado máquina.

Si no se tiene en cuenta el efecto de la inductancia magnetizante y la resistencia de pérdidas magnéticas, la relación I_{stat}/I_{inv} se asemeja a la relación de transformación de la máquina. Además la ganancia del lazo cerrado de corriente dentro del ancho de banda de la potencia se considera unitaria. Se obtiene entonces que la planta es únicamente el producto de la corriente de inversor con la tensión de estator y por una constante:

$$S = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{1}{rtm} \cdot V_{stat_{rms}} \cdot \hat{I}_{inv}$$

En la siguiente figura se representa el diagrama de bloques del lazo de potencia implementado en matlab. Como se puede observar, se ha realizado reducido el sistema siendo el comportamiento final el mismo.

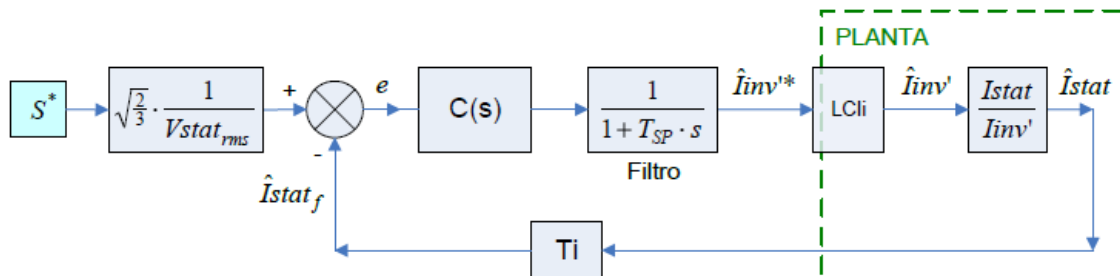


Figura 32. Lazo de potencia implementado en matlab

Como en los anteriores lazos la función de transferencia I_{stat}/I_{inv} contempla todos los elementos del circuito, siendo su bode el que aparece en la siguiente figura, donde se ve que para las frecuencias centrales se asemeja a una función de ganancia constante y fase cero.

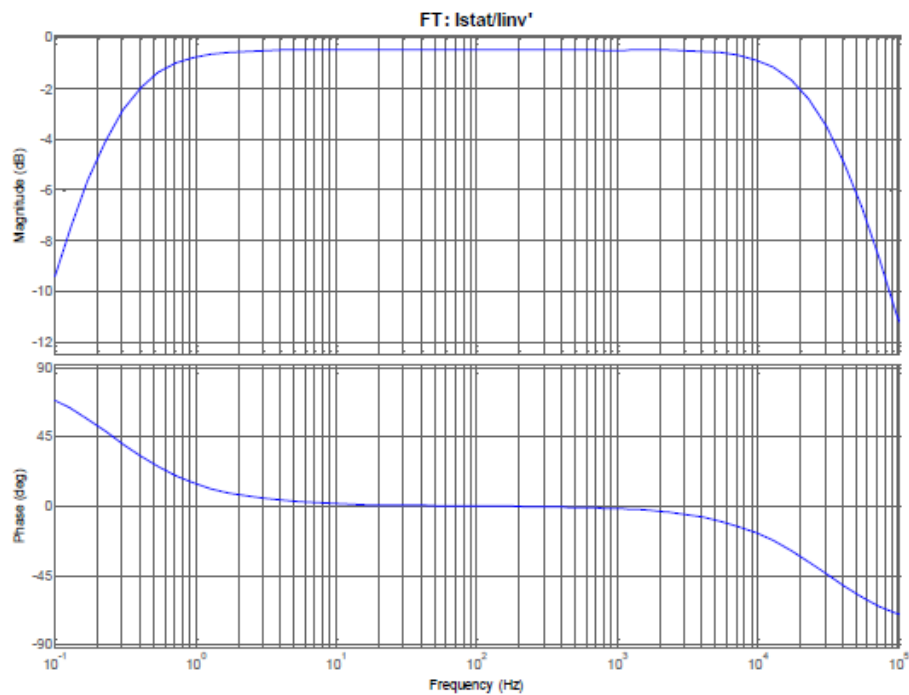


Figura 33. Bode de la función de transferencia I_{stat} / I_{inv}'

Conocidos los lazos de control se calculan los parámetros de los reguladores, el proceso es exactamente el mismo que para el lado red, con la diferencia de que en el lado máquina las variables tendrán distintos valores, así los gráficos que se obtienen para la elección del margen de fase son los siguientes:

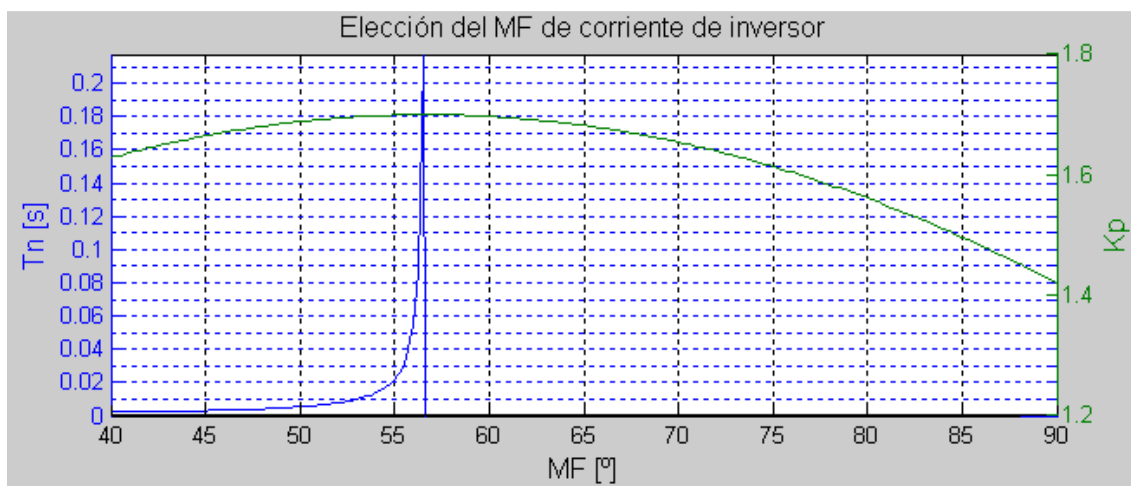


Figura 34. Elección margen de fase del lazo de corriente del lado máquina.

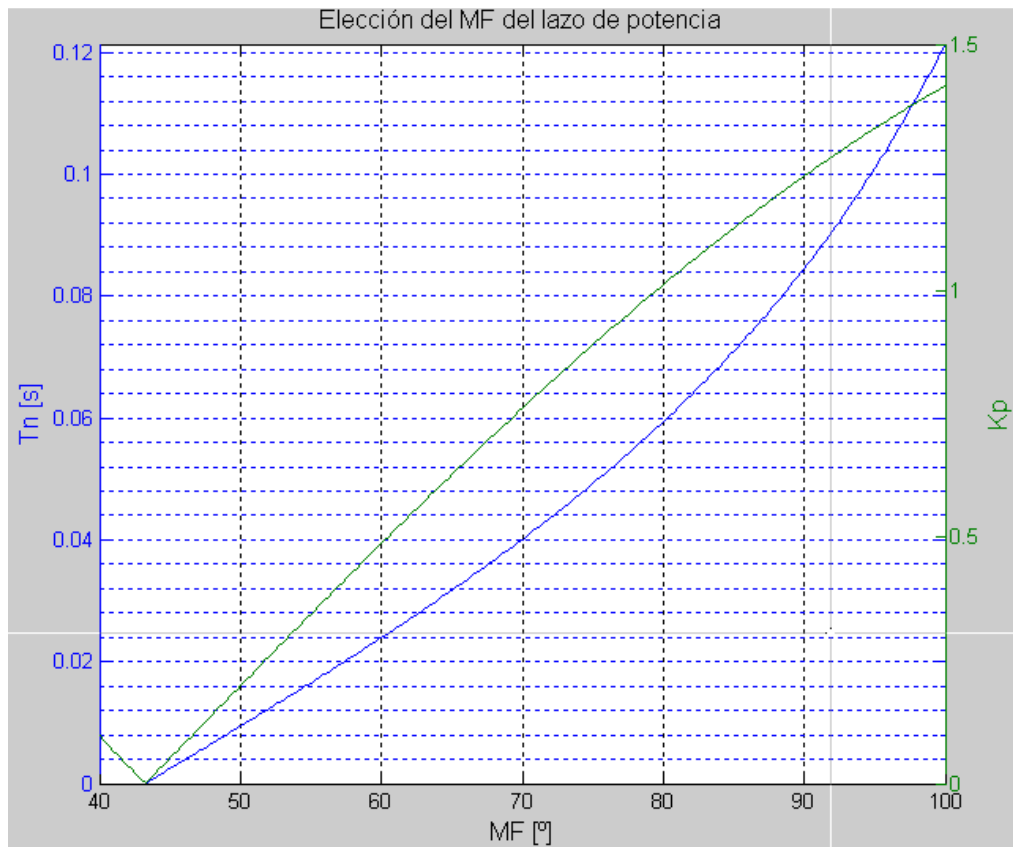


Figura 35. Elección margen de fase del lazo de potencia del lado máquina.

Una vez obtenidos los parámetros del sistema con la técnica explicada el software nos proporciona los diagramas de bode de los lazos de control tanto en lazo abierto como en lazo cerrado.

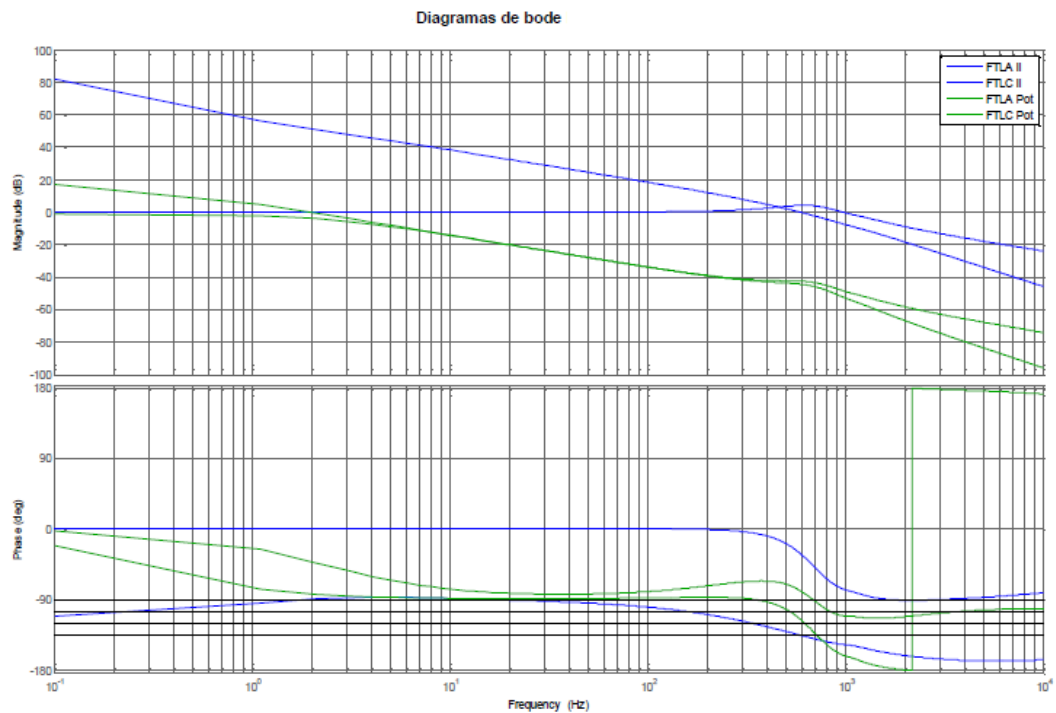


Figura 36. Diagrama de bode lazos de control de convertidor lado máquina

El análisis de un modelo completo puede llegar a ser complejo y muy laborioso. Aquí el toolbox de Matlab SimPowerSystems juega un papel importante, ya que permite extraer cualquier función de transferencia de forma rápida, a partir del modelo eléctrico de la máquina.

A partir de aquí se han explicado los lazos de control de la máquina doblemente alimentada, siendo extrapolables a otros modelos.

Se han representado los bodes de todos los lazos de control tanto en lazo abierto como en lazo cerrado.

Por otro lado se ha reflejado la forma de calcular los parámetros de los reguladores.

5. Topología xDFM

El principal motivo del desarrollo de la configuración xDFM es la mejora en la calidad de la potencia entregada a la red. Debido a la importancia de la energía eólica en la red tenemos que ser capaces de entregar corriente que no produzca perturbaciones y la mantenga estable.

Esta nueva topología consta de un excitador o exciter, que es una máquina síncrona de imanes permanentes, acoplada mecánicamente a un generador doblemente alimentado, además ambas máquinas están conectadas eléctricamente a través de un convertidor de potencia que está unido al rotor de la máquina doblemente alimentada y al estátor del exciter. Con esta topología la potencia solo se transmite a la red a través del estátor de la doblemente alimentada. Esto provoca que éste deberá estar dimensionado para la potencia nominal de la máquina y no para $P_n/(1+s_{nom})$ como en el caso de la DFM.

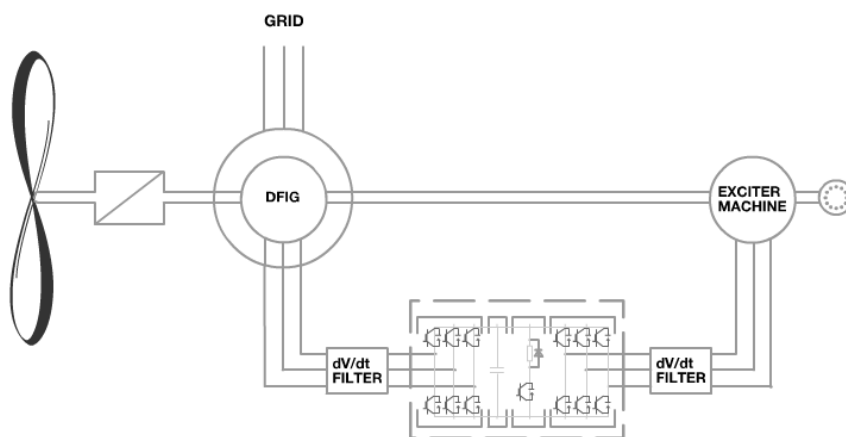


Figura 37. Esquema topología xDFM.

Este sistema puede trabajar tanto a velocidades inferiores como superiores a la de sincronismo, es decir en modo subsíncrono o hipersíncrono respectivamente. Durante el modo subsíncrono el convertidor del lado rotor de la MADA introducirá potencia en éste para permitir evacuar por el estator. Así, para mantener la tensión de bus estable, el convertidor del lado de la máquina de imanes deberá extraer potencia del estator de ésta, haciéndola funcionar como generador; y, por lo tanto, haciendo par en el mismo sentido que la máquina asíncrona.

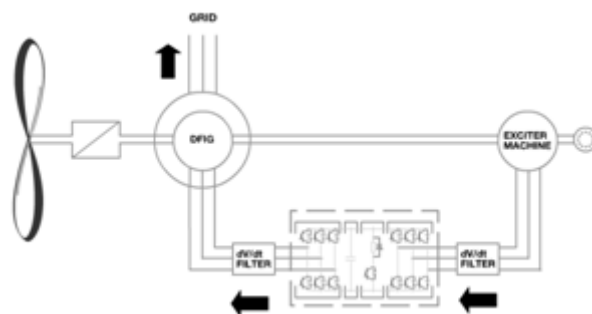


Figura 38. Flujo de potencias en funcionamiento subsíncrono.

Por otro lado, durante el modo hipersíncrono, el convertidor del rotor de la máquina asíncrona extraerá potencia introduciéndola en el bus, luego para mantener la tensión de éste estable, el convertidor de la máquina de imanes deberá inyectar en el estator de ésta potencia, haciéndola funcionar como motor, es decir la máquina de imanes funcionará como motor, haciendo par en el mismo sentido que el viento.

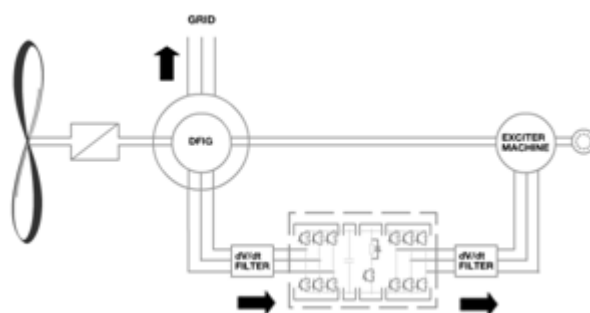


Figura 39. Flujo de potencias en funcionamiento hipersíncrono

El balance de potencias durante todo el rango de velocidades hace que la potencia generada o consumida en el exciter es consumida o generada en el rotor de la doblemente alimentada excepto pérdidas en elementos intermedios.

La potencia que deberán manejar los convertidores electrónicos es el producto del deslizamiento por la potencia estatórica. Esto implica que a igualdad de deslizamiento, cuanto mayor sea la potencia estatórica, mayor será la rotórica y viceversa, esto implica que la potencia manejada por el convertidor electrónico deberá ser mayor en el xDFM.

En la xDFM, la potencia estatórica (P_s) es la potencia neta total del sistema (P_n), ya que éste es el único punto de conexión a red, esto implica que en régimen subsíncrono, la potencia por el estator será inferior al de una DFM equivalente, ya que en ésta, la potencia estatórica (P_{sDFM}) es la neta del sistema (P_{nDFM}) más el consumo del circuito rotórico (P_{rDFM}). Al contrario, en régimen hipersíncrono, la potencia estatórica

de una xDFM es superior a la de una DFM equivalente, ya que en ésta última, la potencia estatórica es la neta del sistema menos el aporte del circuito rotórico.

El hecho de que en régimen hipersíncrono la potencia estatórica en la xDFM sea superior a la de una DFM convencional, hace que, a igualdad de deslizamiento, la potencia que deben manejar los convertidores sea mayor en la xDFM.

Consideramos que el deslizamiento nominal es del 10%, se verifica lo siguiente:

$$P_{sDFM}=P_n/(1+0,1)$$

$$P_{rDFM}=s*P_{sDFM}=0,1*0,909*P_n=0,0909*P_n$$

$$P_{sxDFM}=P_n$$

$$P_{rxDFM}=s*P_{sxDFM}=0,1*P_n$$

Si ahora se calcula para el punto más desfavorable ($s_{max}=30\%$) se verifica lo siguiente:

$$P_{sDFM}=P_n/(1+0,3)$$

$$P_{rDFM}=s*P_{sDFM}=(0,3/1,3)*P_n=0,23077*P_n$$

$$P_{sxDFM}=P_n$$

$$P_{rxDFM}=s*P_{sxDFM}=0,3*P_n$$

En definitiva, en la topología xDFM el estátor de la máquina asíncrona deberá estar dimensionado para la potencia neta total del sistema.

Los convertidores electrónicos deberán ser capaces de manejar la potencia neta total del sistema multiplicada por el deslizamiento máximo permisible (esto viene a ser aproximadamente un 30% de la potencia neta total). Tal y como se aprecia en el análisis a velocidad nominal, el incremento de potencia requerido en el convertidor es despreciable (1%); si bien en las sobrevelocidades el convertidor de una xDFM deberá ser capaz de manejar hasta aproximadamente un 10% más de potencia que el de una DFM equivalente.

5.1 Control mediante convertidor de potencia

Como ya se ha comentado anteriormente disponemos de un sistema de conversión, que denominaremos convertidor de potencia, que conecta eléctricamente el rotor de la MADA y el estator del exciter con el que controlaremos el flujo de potencias del sistema. Al igual que en las topologías anteriormente estudiadas el sistema de conversión consta de dos convertidores trifásicos que actúan tanto de inversores como de rectificadores y de un bus de continua que almacena energía.

Estos convertidores trabajan en posición back to back unidos ambos al bus de continua, así cada uno de ellos realiza una función determinada y recibe una denominación particular, en este caso al convertidor unido al rotor de la MADA le denominaremos convertidor lado máquina y al que está unido al estator del exciter convertidor lado exciter.

Para implantar el control de dichos convertidores utilizaremos la modelización de las máquinas en ejes $d-q$ explicadas anteriormente para aprovecharnos de las ventajas que nos ofrece, habrá que tener muy en cuenta que tipo de variables estamos utilizando en cada caso para utilizar en ángulo correcto en las transformaciones, según sean del estator de la MADA, del rotor de la misma o del estator del exciter.

5.1.1 Convertidor lado máquina

Su función es exactamente la misma que para la topología doblemente alimentada, es decir regular la tensión y corriente del rotor y controlar el deslizamiento para satisfacer las consignas de potencia (P_{ref} , Q_{ref}) en el estator exigidas por el PLC.

Utilizamos el control en $d-q$ orientando la tensión del estator de la máquina al eje q , así conseguimos controlar tanto la potencia activa (P_s) como la reactiva (Q_s) de forma independiente actuando sobre la corriente en eje q (i_{rq}) o en el eje d (i_{rd}) como se puede observar en las siguientes relaciones:

$$P_s = -v_s \frac{L_{sr}}{L_s} i_{qr} \quad Q_s = \frac{v_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{v_s L_{sr}}{L_s} i_{dr}$$

Implementemos dos lazos de control, uno para el eje d y otro para el eje q , ambos lazos van a seguir una misma filosofía, que consistirá en un lazo interno de corriente y un lazo externo de potencia que generarán una consigna de disparo de los IGBT's del convertidor para obtener a la salida del mismo la tensión deseada.

El funcionamiento de éstos sigue la siguiente estructura:

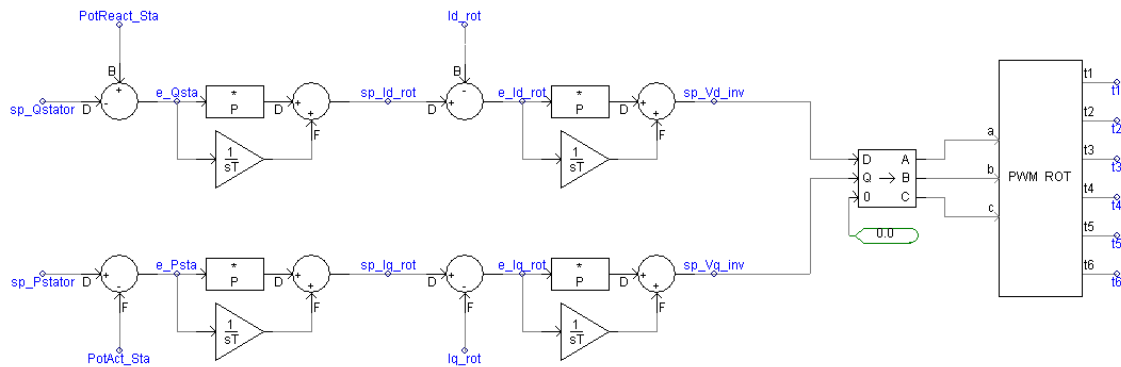


Figura 40. Lazos de control del lado máquina.

Describimos el funcionamiento para uno de ellos. El lazo recibe la consigna o “set point” del PLC que se compara con la potencia medida, de aquí tenemos el error, que es introducido en un controlador PI que a su salida nos proporciona el “set point” de corriente, éste es utilizado para el lazo interno de corriente donde es comparado con la corriente medida, la diferencia entre ambas constituirá el error en corriente que introducimos en otro controlador PI que nos da un “set point” de tensión que lo adaptamos para utilizarla como moduladora para el control PWM que origina los disparos del convertidor.

5.1.2 Convertidor lado exciter

Su función principal es mantener la tensión de bus constante y regular la magnetización del exciter para controlar la magnitud de su tensión de estator. Utilizamos la descomposición en ejes d - q alineando en eje d con el flujo creado por los imanes en el rotor, en consecuencia el eje q queda alineado con la tensión de vacío. Con esto conseguimos controlar a través del eje q la tensión de bus y del eje d la tensión de estator, lo que nos lleva a implementar un lazo de control para cada eje.

El lazo de control para el eje d lo hacemos funcionar a partir de la consigna de corriente, que será nula si la tensión de estator del exciter no alcanza valores peligrosos y será un valor, cuando alcance valores peligrosos, que desmagnetice la máquina para que a una velocidad dada la tensión inducida en estator sea menor y pueda ser controlada por el convertidor.

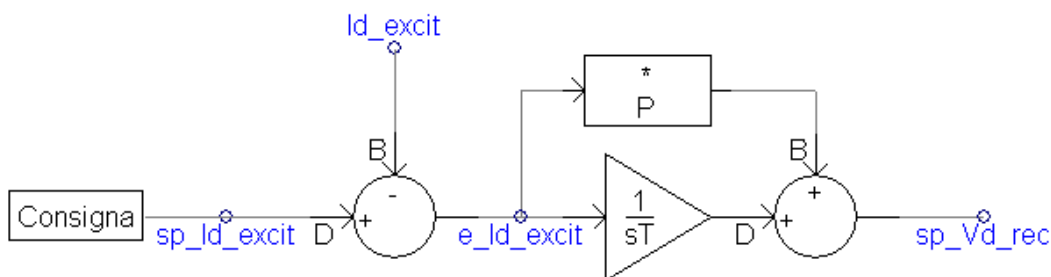


Figura 41. Lazo de control eje d del lado exciter.

Comparamos la consigna de corriente con la medida y obtenemos el error que es introducido en un controlador PI que nos proporciona la consigna de tensión para la moduladora del PWM.

El lazo de control para el eje q esta compuesto por tres lazos, el más interno de corriente, el intermedio de potencia y el exterior de tensión como se puede observar a continuación:

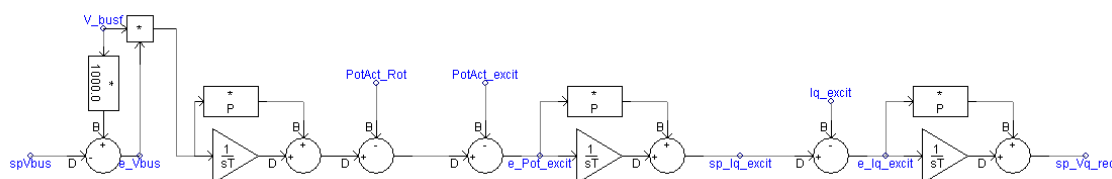


Figura 42. Lazo de control eje q del lado exciter.

A partir de la consigna de tensión de bus obtenemos el error comparándola con la medida, éste lo introducimos en un PI y a su salida generamos una consigna de potencia activa en el estator del exciter, para que la posterior comparación de esta consigna con la medida éste adaptada multiplicamos el error en la tensión de bus por la propia tensión de bus ($\text{error_Vbus} * \text{Vbus}$) y esto último es lo que introducimos en el PI. Así a la salida del controlador obtenemos la consigna de potencia que necesitamos extraer o introducir por el convertidor lado exciter, para afinar el control añadimos un feedforward de la potencia consumida en el rotor de la MADA, restando ésta a la consigna, de esta forma conseguimos compensar la perturbación que origina el lado máquina en el control.

Los lazos internos del control funcionan de la misma manera que el exterior, a partir de una consigna y su comparación con la medida generamos un error que introducimos en un controlador PI que nos vuelve a generar la consigna oportuna para

realizar la acción de control. En este caso actuamos generando una señal de tensión que será adaptada como moduladora para un control PWM.

5.1.3 Bus de continua

Tiene exactamente la misma función que para los casos de generación con MADA y Full Converter.

6. Simulaciones

Una vez explicados y planteados los lazos de control de las topologías doblemente alimentada, full converter y xDFM se presentan las respuestas del sistema ante dicho control.

Para ello se utiliza el software PSCAD como herramienta de simulación. Antes de entrar con las simulaciones de las distintas topologías se exponen algunas características de PSCAD para poder reconocer los elementos y entender el lenguaje.

PSCAD dispone de una librería y un menú propio de los cuales se extraen los siguientes elementos:

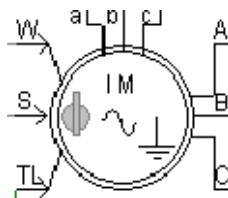


Figura 43. Máquina asíncrona doblemente alimentada.

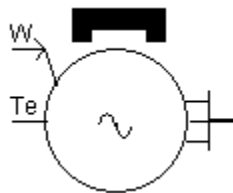


Figura 44. Máquina síncrona de imanes permanentes.

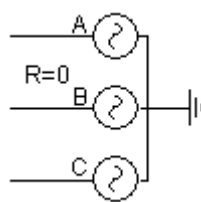


Figura 45. Fuente trifásica senidal ideal

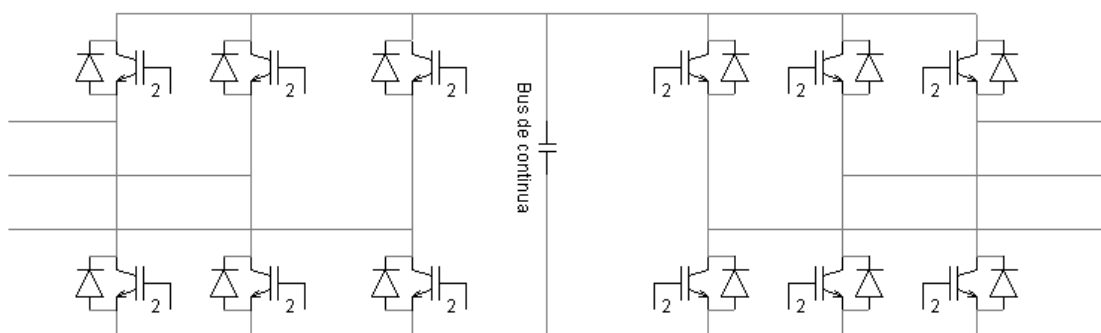


Figura 46. Sistema de conversión. Convertidor back to back.

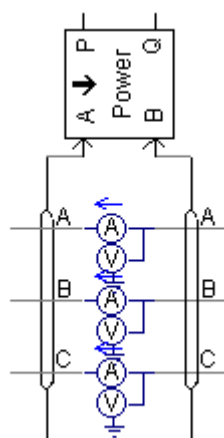


Figura 47. Sensor de medición de potencia activa y reactiva

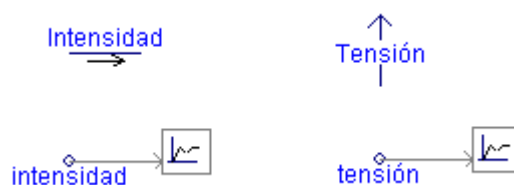


Figura 48. Sensores de intensidad y tensión. Puntos de medición para graficar.

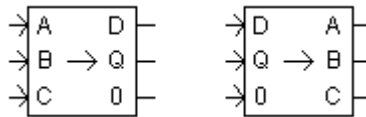


Figura 49. Bloque transformador ejes abc a ejes dq y viceversa.

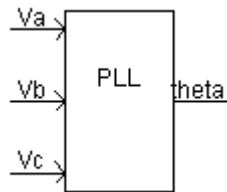


Figura 50. Bloque PLL para cálculo del ángulo.

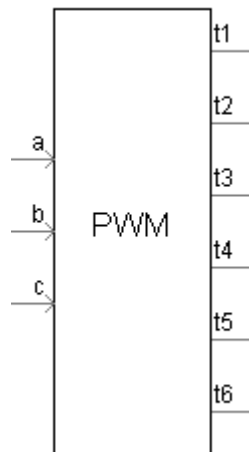


Figura 51. Generación de disparos para los IGBT mediante modulación PWM.

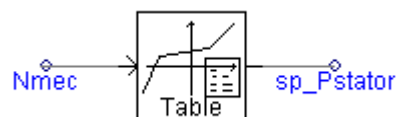


Figura 52. Generador de set-point de potencia en función de la velocidad

6.1 Máquina asíncrona doblemente alimentada

En primer lugar se muestra la topología, definida en PSCAD:

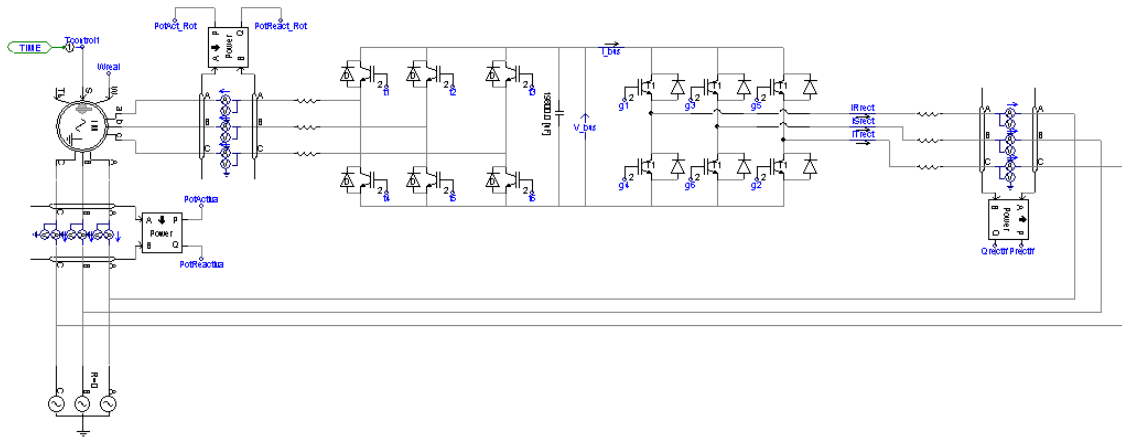
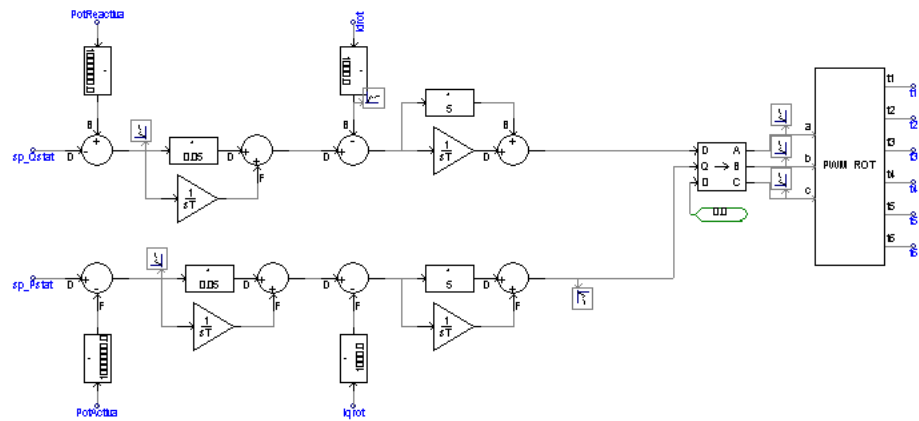


Figura 53. Topología con MADA en PSCAD.

A parte del modelo propiamente dicho se muestran también los lazos del control del sistema implementados en PSCAD, añadiéndoles la entrada en el generador de disparos PWM.

CONTROL LADO MÁQUINA



CONTROL LADO RED

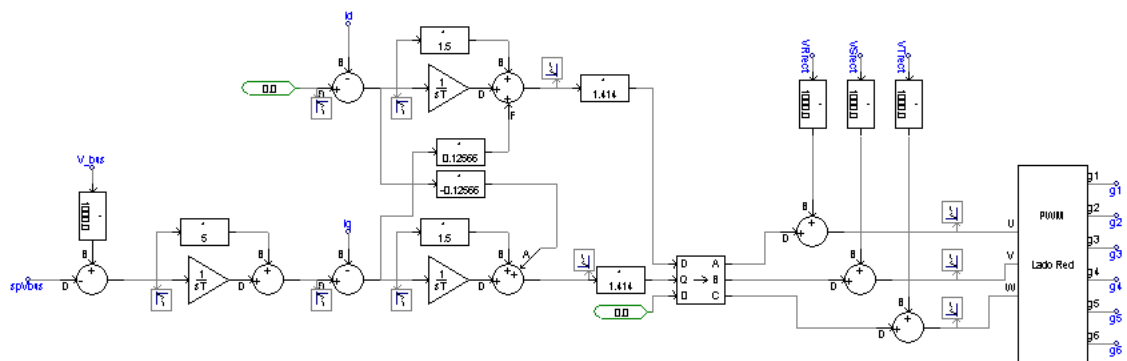


Figura 54. Lazos de control topología con MADA.

Para obtener un correcto funcionamiento de los lazos es necesario transformar las variables medidas del modelo de ejes abc a ejes dq.

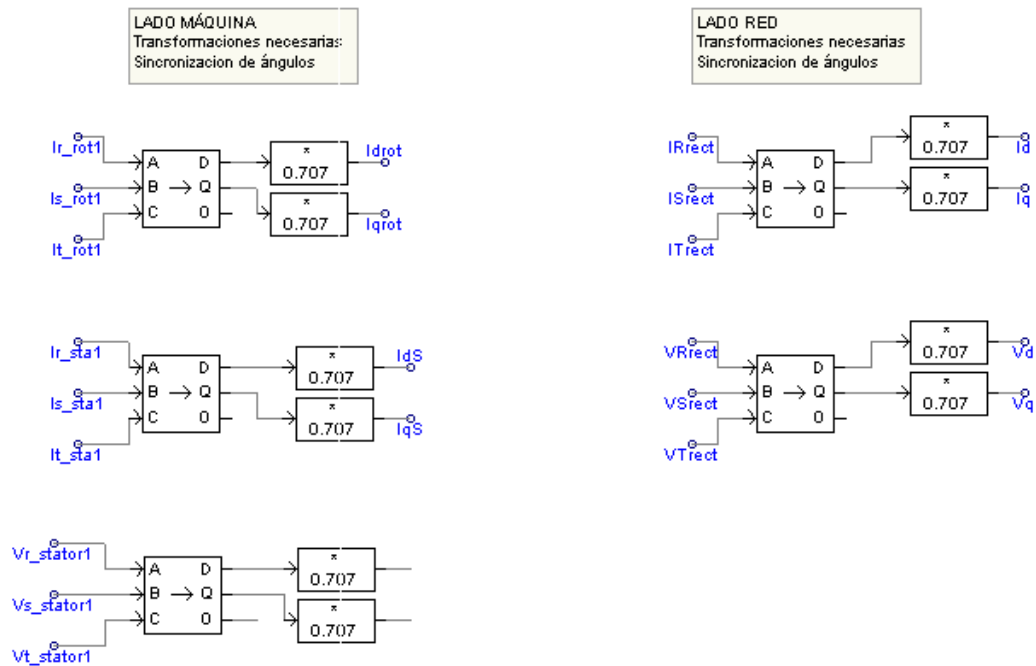


Figura 55. Transformaciones de ejes abc a dq.

Para que estas transformaciones sean llevadas a cabo con total garantía se hace uso de la PLL y a partir de ella se calculan todos los ángulos necesarios.

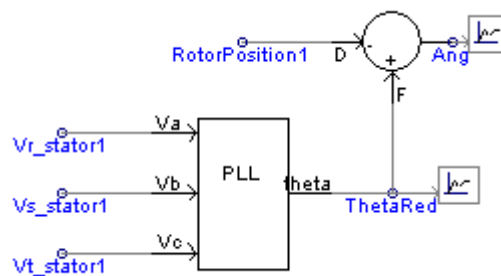


Figura 56. Cálculo de ángulos para sincronización.

Una vez modelizada la topología en PSCAD se somete al modelo a las simulaciones siguientes:

- Control de la potencia activa y reactiva del estator

Funcionamiento en hipersíncrono con $s=2\%$, set point de potencia activa igual 1,8 MW y de potencia reactiva igual a 0 MVar.

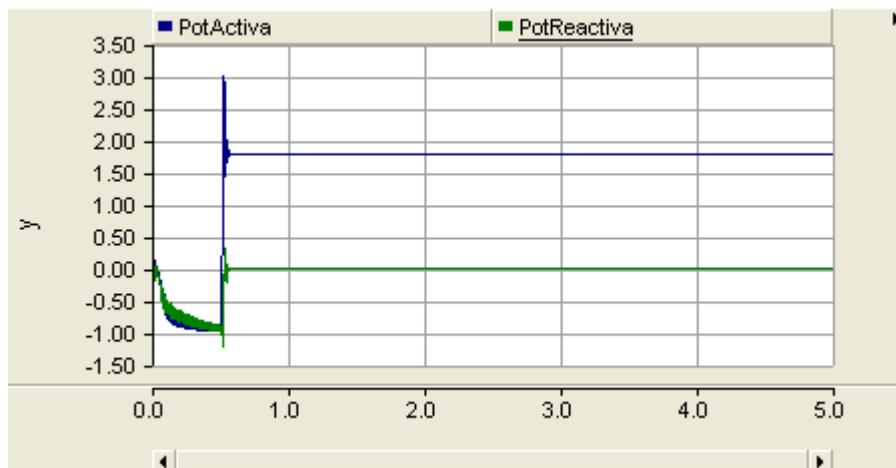


Figura 57. Potencia activa y reactiva del estátor

El control tras un transitorio de estabilización sigue perfectamente a la referencia de manera estable.

- Control de la tensión del bus de continua

Se toma un set-point de tensión de bus igual a 1135 V.

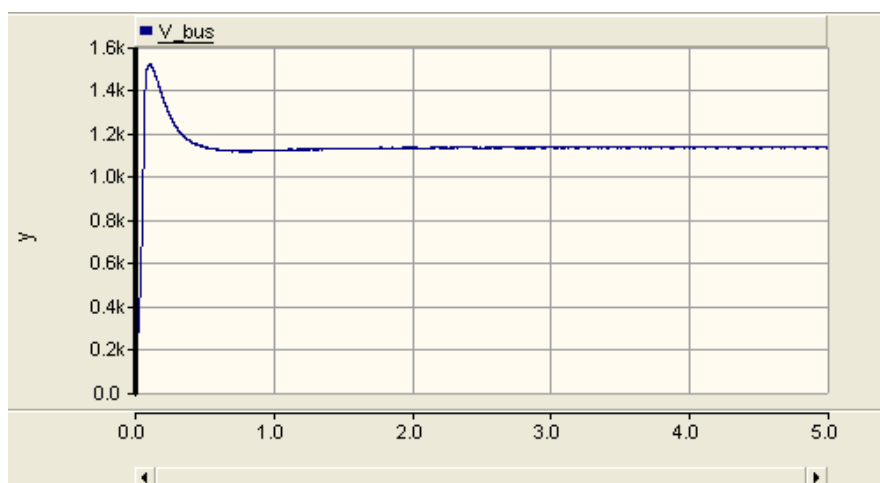


Figura 58. Tensión de bus en función del tiempo.

Se observa que el bus se carga desde los 0 V con un pico y se fija en los 1135 V requeridos una vez que el control se estabiliza.

- Moduladoras

A continuación se muestran las moduladoras de ambos lazos de control que generan los disparos de los IGBT, en modulación PWM, para el control de las potencias de estator en un caso y de la tensión de bus en otro.

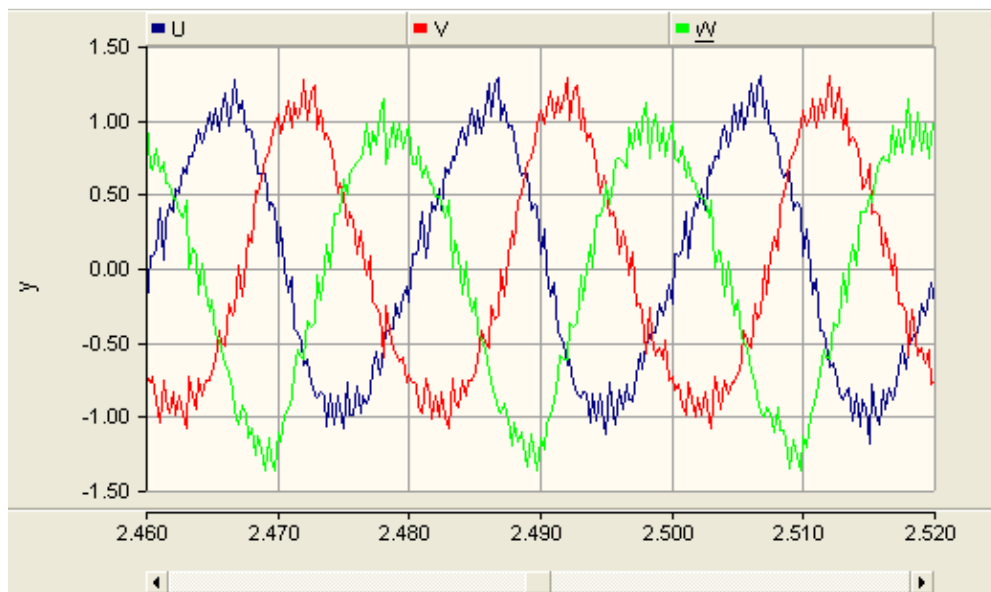


Figura 59. Moduladoras convertidor lado red

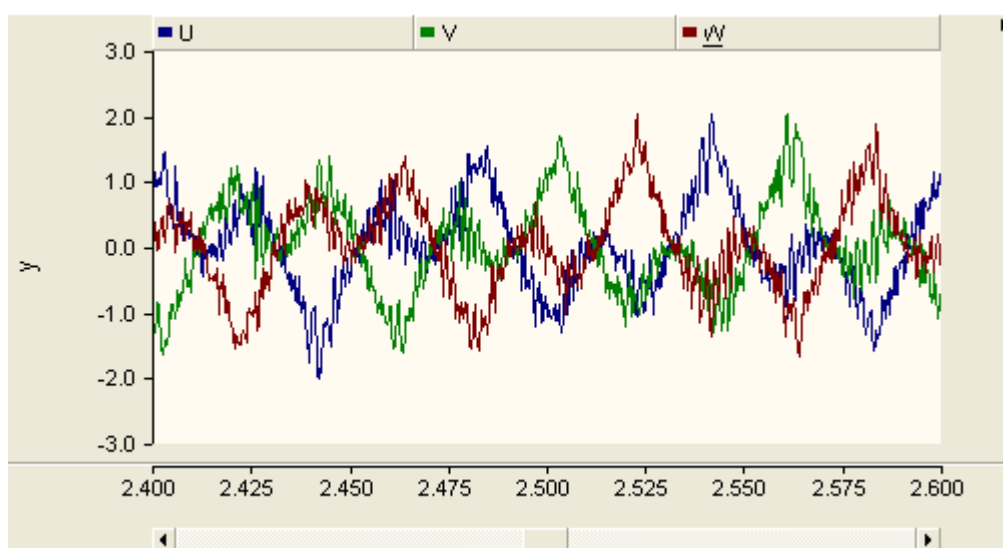


Figura 60. Moduladoras convertidor lado máquina.

- Angulos para transformaciones

En la topología doblemente alimentada se diferencian dos zonas en lo que a los ángulos se refiere, se tienen variables de estator y variables de rotor. Se utiliza la PLL para calcular el ángulo de las variables de estator y para las del rotor, restamos a éste la posición del rotor de la máquina medida con un encoder.

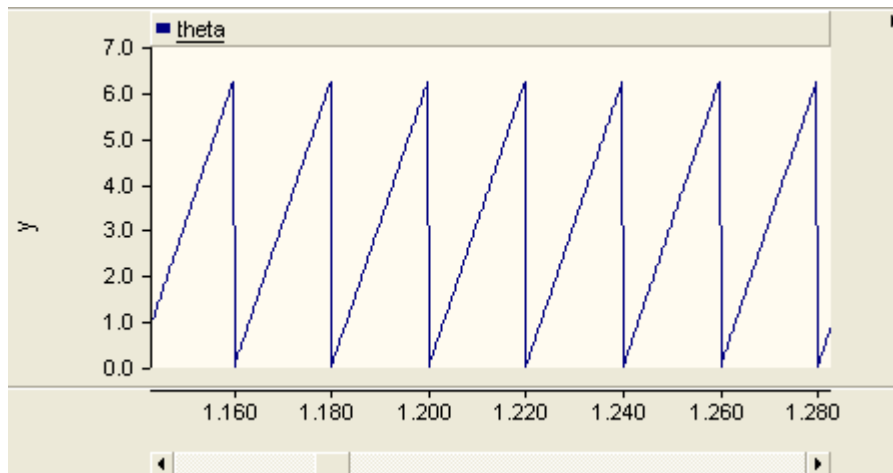


Figura 61. Angulo de sincronización de variables de estátor.

Se observa en la gráfica la evolución del ángulo en función del tiempo viéndose que cíclicamente avanza de 0 a 2π , este ciclo es igual a la frecuencia de red, que en este caso es de 50 Hz porque se ve que el periodo es igual a 20 ms. Dado que en el modelo la red es una fuente ideal a 50 Hz, esta gráfica sirve para comprobar que la PLL funciona correctamente.

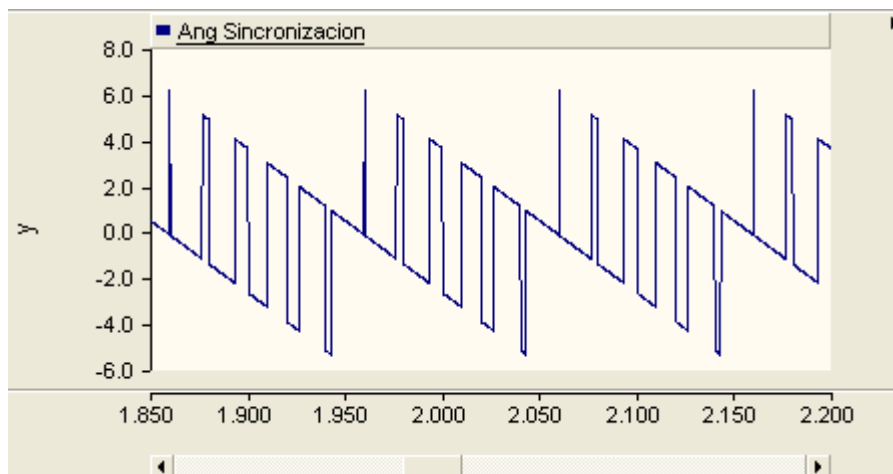


Figura 62. Angulo de sincronización de variables de rotor

En este caso, aunque no se observe con nitidez como en el caso anterior, se puede extraer como información que el ciclo de la señal se repite cada 100 ms, es decir cada 10 Hz. Este dato corrobora el teórico, ya que la frecuencia de las variables del rotor son las del estator multiplicadas por el deslizamiento ($f_r = s \cdot f_s$), en este caso:

$$f_r = 0,02 \cdot 50 = 10 \text{ Hz}$$

- Transformación de tensión de estator

Se parte de una red trifásica de 690 V eficaces entre fases, lo que equivale a 398,4 V entre fase y tierra. Se transforma la tensión a ejes dq utilizando el ángulo de sincronización de la PLL, alineando el eje q con la tensión.

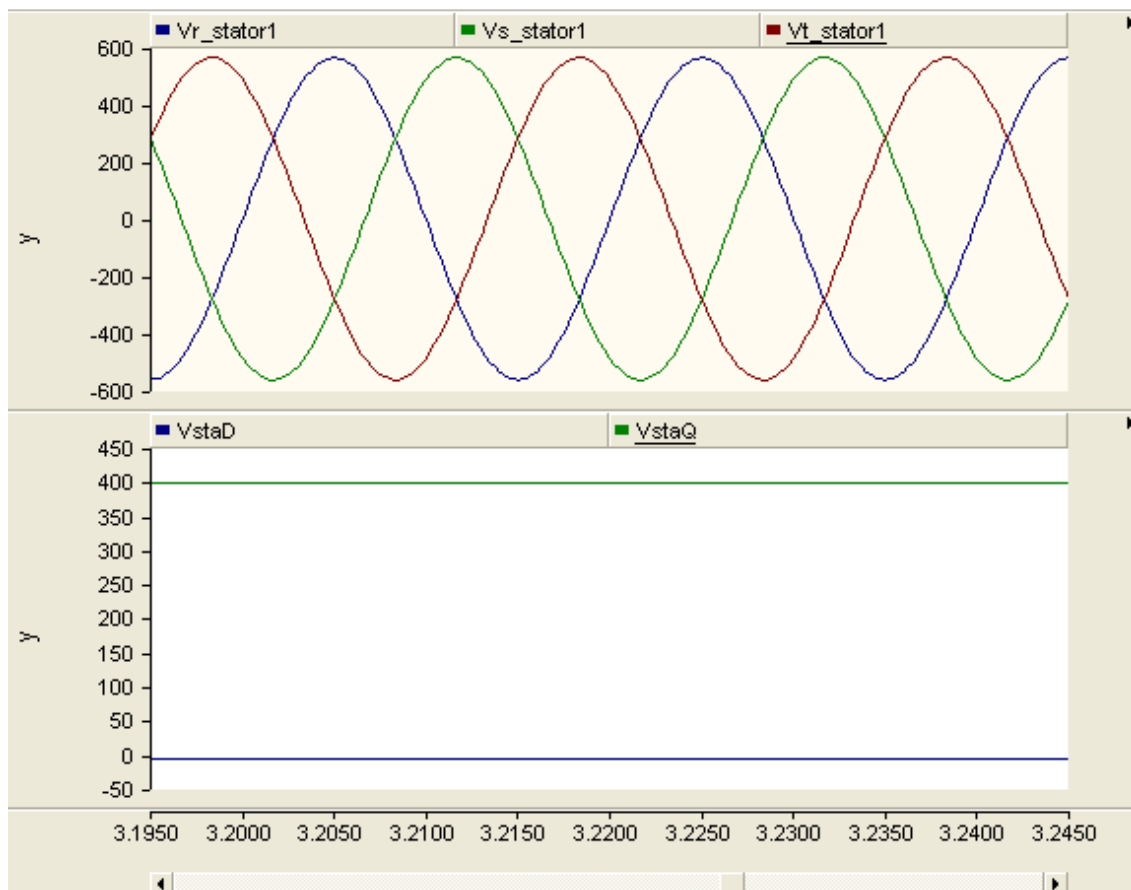


Figura 63. Tensión de estator en ejes abc y dq respectivamente.

Se comprueba que la transformación es correcta ya que toda la tensión queda en el eje q y en el eje d la tensión es nula. En caso de que no fuese de esta manera significaría que la alineación de los ejes no es correcta debido, muy probablemente, a un mal cálculo del ángulo de sincronización.

Una vez vistas las simulaciones queda comprobado que los lazos de control propuestos cumplen con su cometido.

6.2 Full converter

Se muestra la topología implementada en PSCAD:

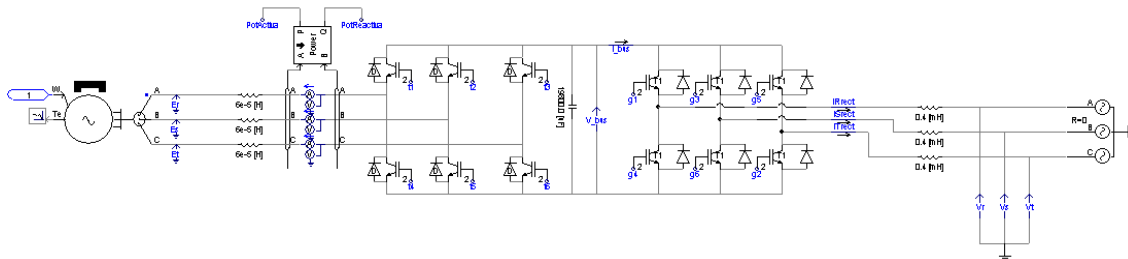


Figura 64. Topología full converter en PSCAD.

A parte del modelo propiamente dicho se muestran también los lazos del control del sistema implementados en PSCAD, añadiéndoles la entrada en el generador de disparos PWM.

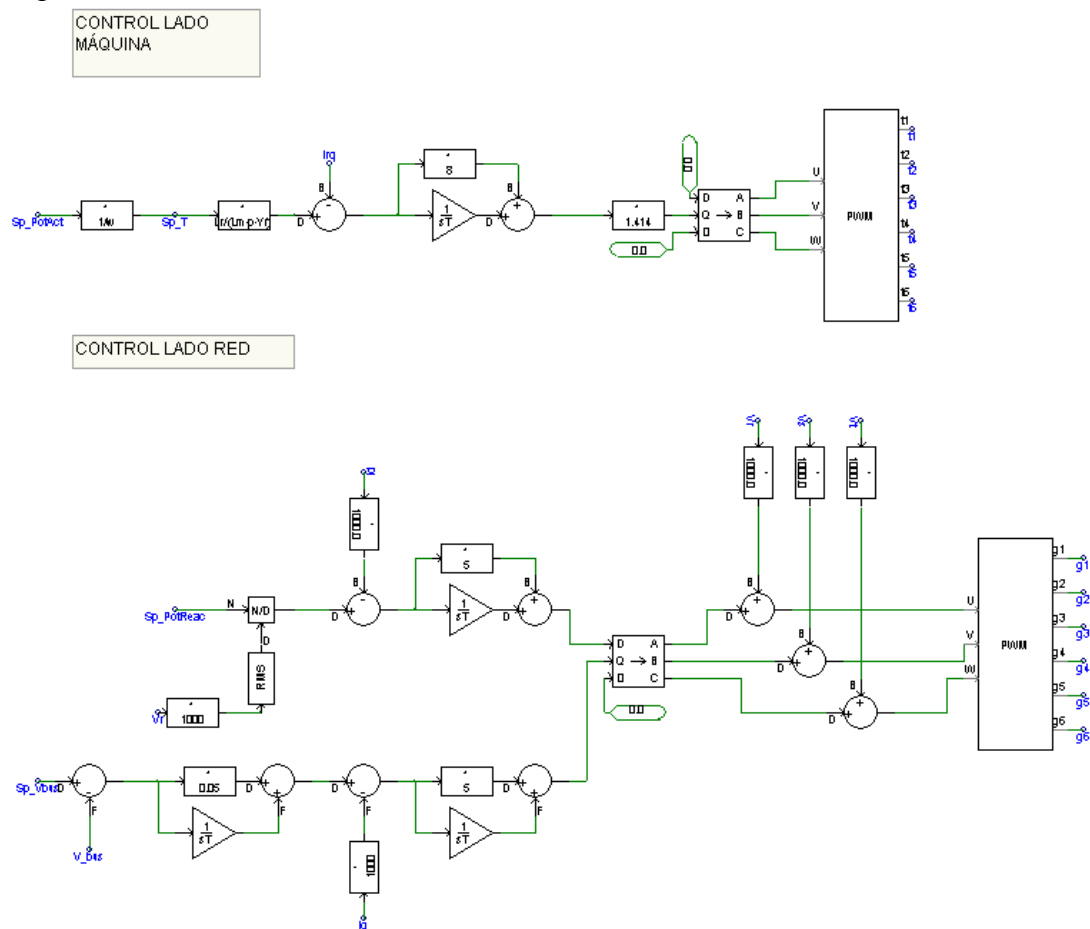


Figura 65. Lazos de control topología full converter.

A continuación se muestran las transformaciones necesarias en el cambio de variables a ejes dq, en este caso se tiene variables de red y variables de máquina, para las primeras obtenemos el ángulo a través de la PLL igual que en el caso de la doblemente alimentada y para las últimas se obtiene el ángulo a partir de la posición del rotor, ya que se trata de una máquina síncrona, medida con un encoder en la realidad y que en PSCAD es una variable que nos proporciona el motor.

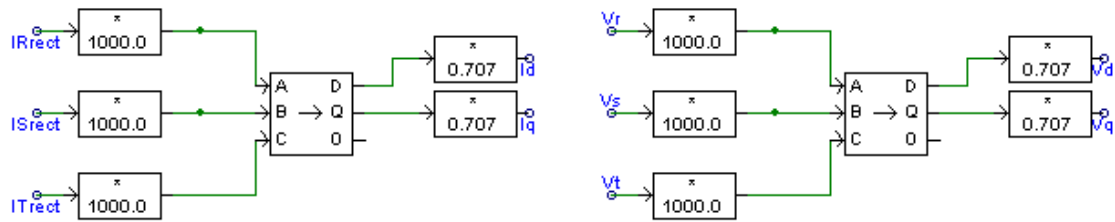


Figura 66. Transformaciones de variables de estator.

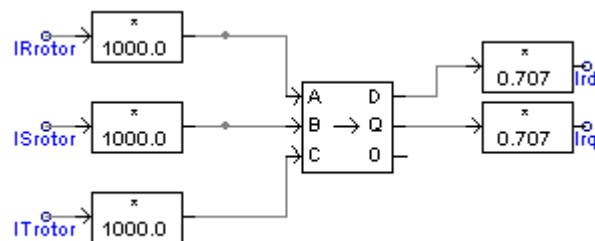


Figura 67. Transformaciones de variables de rotor.

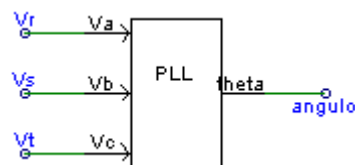


Figura 68. PLL para cálculo ángulo de sincronización de red.

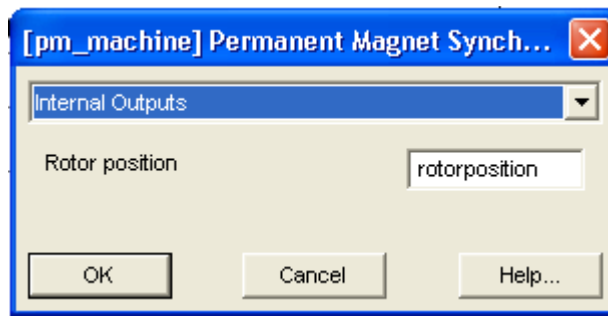


Figura 69. Posición rotor de la máquina síncrona de imanes.

Se simulan las características más representativas del modelo en PSCAD obteniéndose:

- Potencia activa en el estator de la máquina.

Se simula con un set point de potencia activa de 0,6 MW.

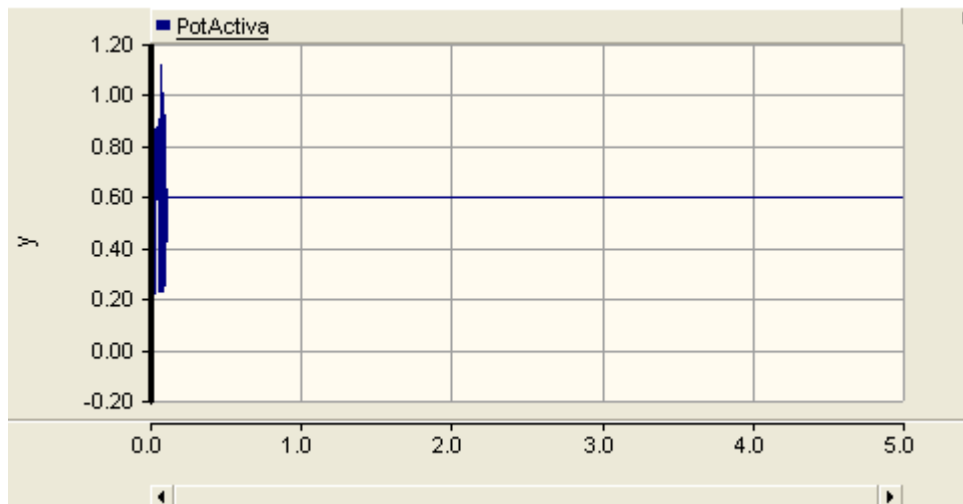


Figura 70. Potencia activa del estátor de la máquina.

Se controla la potencia activa con la corriente del eje q, que es la que origina par, y la potencia reactiva con el eje d, que en nuestro caso tiene siempre una consigna igual a cero.

- Tensión de bus.

Para una referencia de 1135 V se obtiene la siguiente respuesta:

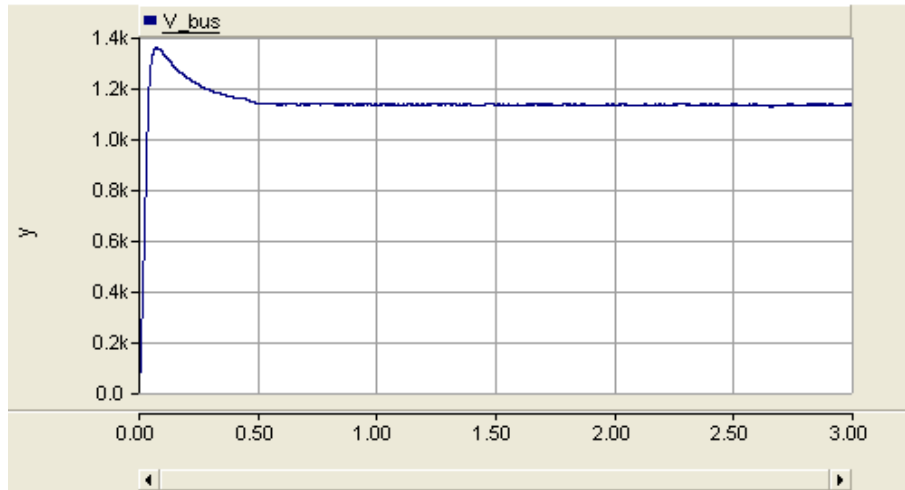


Figura 71. Tensión en el bus de continua.

Se observa que se parte con el bus descargado y que al girar la máquina éste se carga con un pequeño pico por encima de la consigna que el control se encarga de corregir y estabiliza el bus.

- Angulos de sincronización.

Como ya se ha comentado se tienen variables de estátor de la máquina y variables de red, cada una necesita su propio ángulo de sincronización para las transformaciones, que son los siguientes:

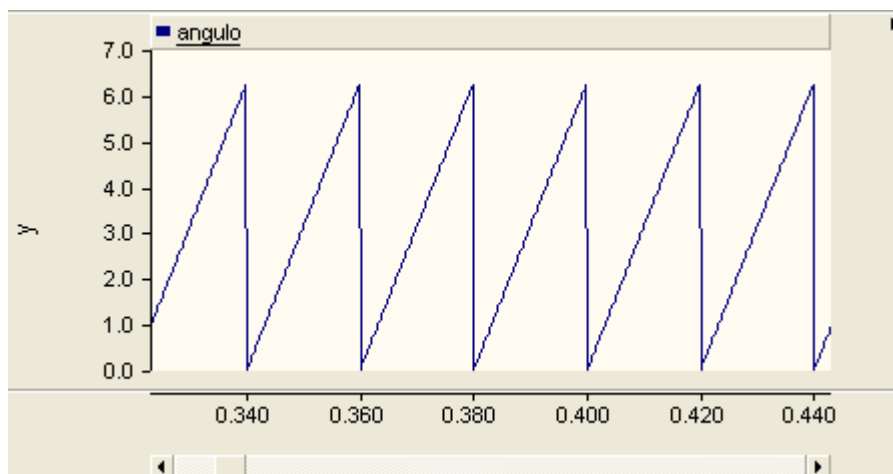


Figura 72. Ángulo de sincronización de variables de red (PLL).

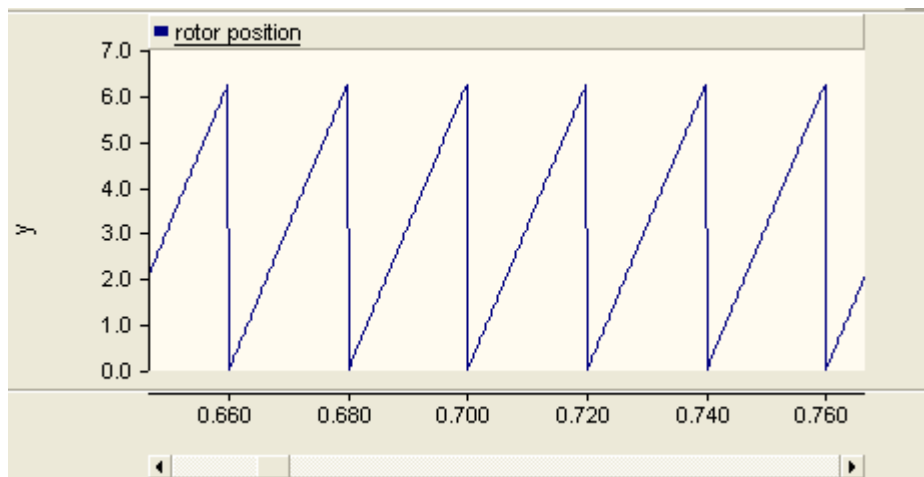


Figura 73. Angulo de sincronización de variables de máquina (encoder).

Se observa que ambos ángulos tienen una misma frecuencia de 50 Hz, o lo que es lo mismo un periodo de 20 ms. Esto es debido a que la red es de 50 Hz y a que la máquina síncrona gira en este caso particular a la velocidad de sincronismo nominal, que son 50 Hz. A continuación se muestra el ángulo de sincronización de la máquina si ésta gira al doble de velocidad que en el caso anterior:

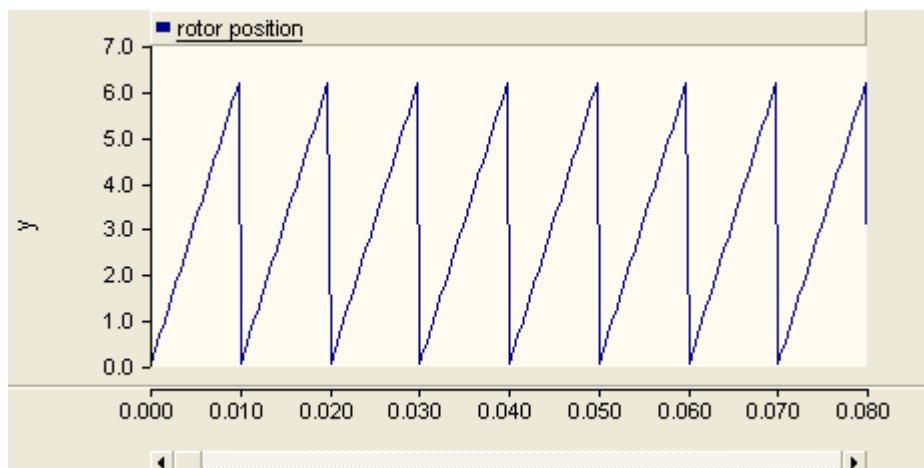


Figura 74. Angulo de sincronización girando al doble de velocidad.

Ahora se puede ver que al girar el rotor de la máquina al doble de velocidad el periodo se ha reducido a 10 ms, teniendo en ángulo una frecuencia de 100 Hz. Es importante conocer correctamente el ángulo de sincronización en cada momento para no cometer errores en las transformaciones.

6.3 xDFM

Primeramente se presenta el modelo implementado en PSCAD, donde se puede observar que para simular el acoplamiento mecánico de los rotores de las máquinas se adapta la consigna de velocidad en ambas para que sea la misma:

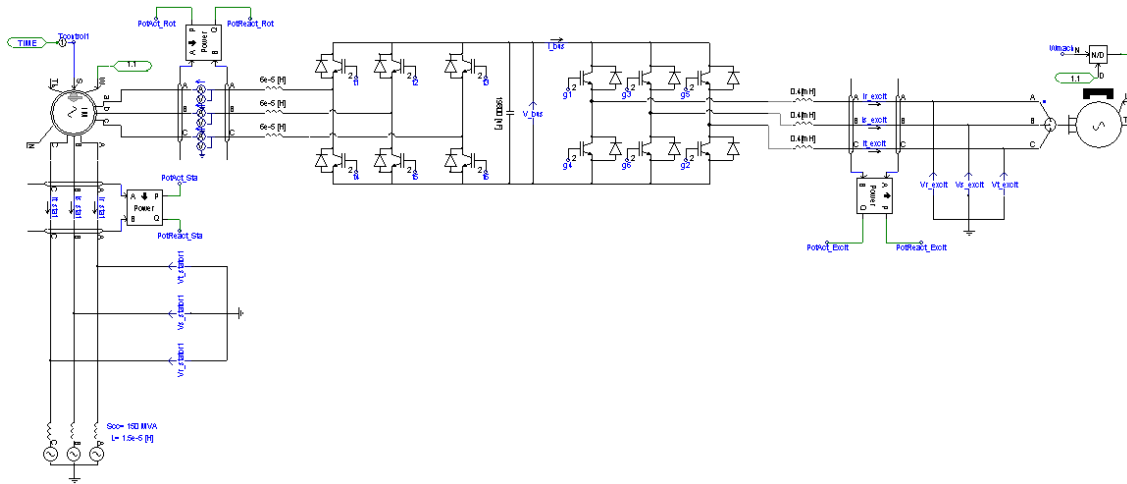


Figura 75. Modelo en PSCAD de la topología xDFM.

A parte del modelo propiamente dicho se muestran también los lazos del control del sistema implementados en PSCAD, añadiéndoles la entrada en el generador de disparos PWM.

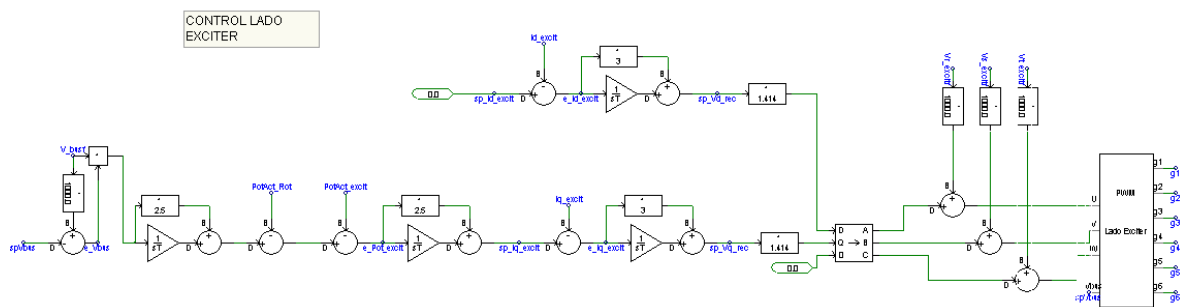


Figura 76. Lazos de control lado exciter.

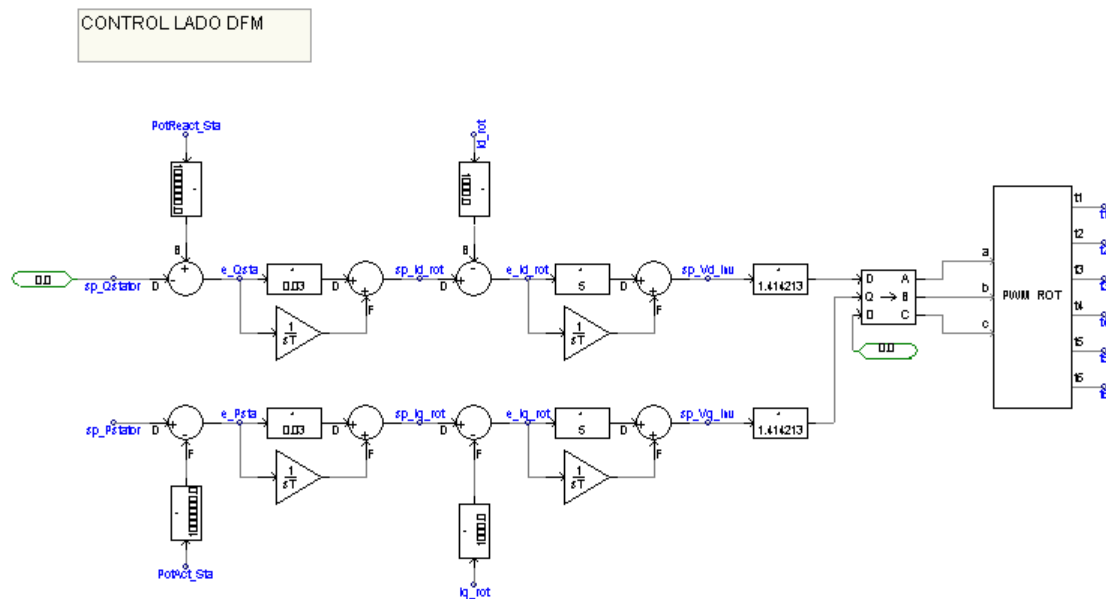


Figura 77. Lazos de control lado máquina.

A continuación se muestran las transformaciones realizadas de ejes abc a ejes dq:

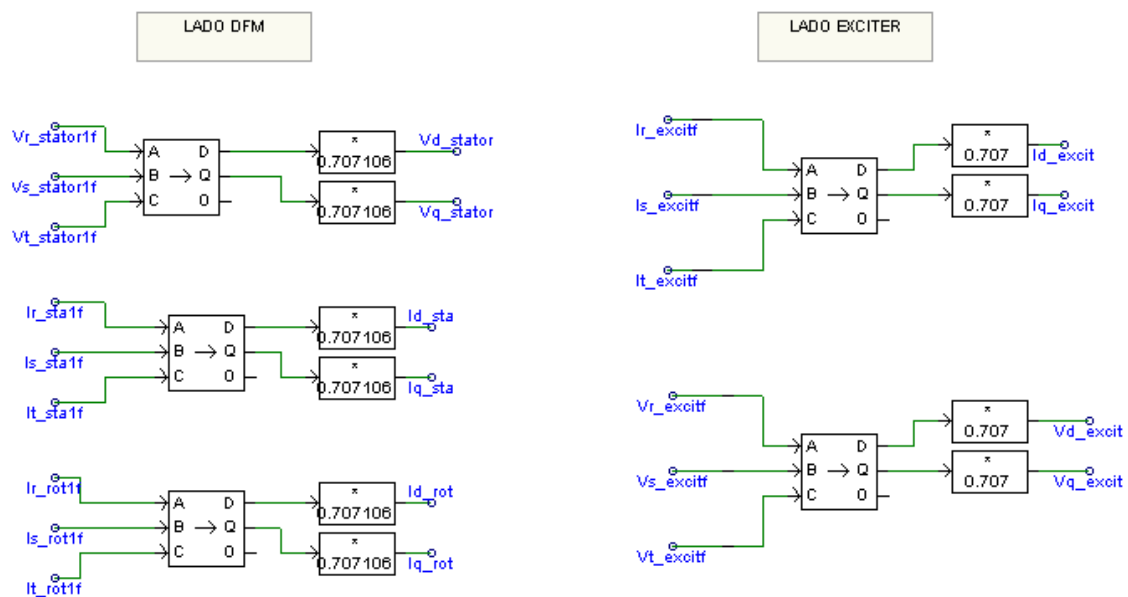


Figura 78. Transformaciones de variables de ejes abc a ejes dq.

En la topología xDFM se tienen variables de estátor de la máquina asíncrona doblemente alimentada, cuyo ángulo de sincronización se calcula mediante la PLL, variables de rotor de la misma máquina, cuyo ángulo se calcula restando al ángulo de la PLL la posición del rotor medida con un encoder, y variables de estátor del exciter en donde el ángulo es la posición del rotor, medido con un encoder. Las medidas de los encoders son variables proporcionadas por el PSCAD de la manera que se ve a continuación:

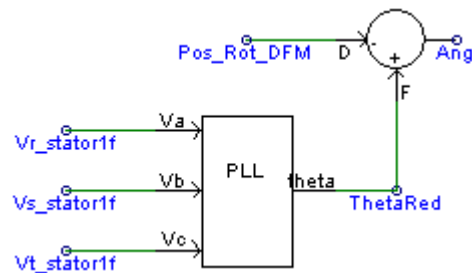


Figura 79. Cálculo de ángulos en estor y rotor de la MADA.

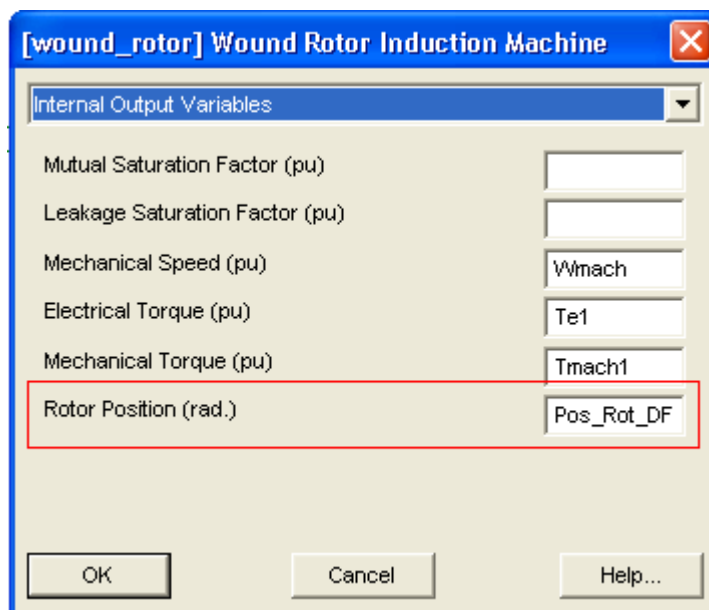


Figura 80. Posición del rotor de la MADA.

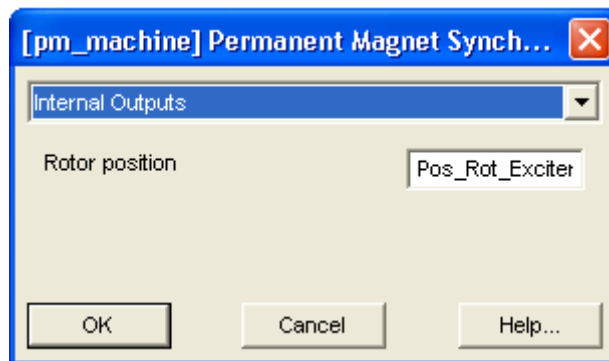


Figura 81. Posición rotor del exciter.

Una vez presentado e implementado el modelo en PSCAD se simula para observar su comportamiento. A partir de los puntos de la curva par-velocidad se simula el modelo en dos situaciones, generando en subsíncrono y en hipersíncrono.

Point	X	Y	
X1	0.0	Y1	0.0
X2	700.0	Y2	300000.0
X3	775.0	Y3	350000.0
X4	850.0	Y4	500000.0
X5	950.0	Y5	600000.0
X6	1075.0	Y6	1500000.0
X7	1300.0	Y7	2200000.0
X8	1360.0	Y8	2200000.0
X9	1400.0	Y9	2200000.0
X10	9.0	Y10	9.0

Figura 82. Puntos curva par-velocidad.

Antes de mostrar los resultados se presentan las características de las máquinas utilizadas:

Máquina asíncrona TAR560L6N60N-001 2.52MW 60Hz.

- Potencia de estátor nominal = 2520 kW
- $p = 3$
- Potencia de rotor nominal = 336 kW
- Deslizamiento nominal = 13.33 %
- $X_s = 38.67 \text{ mOhms}$
- $X_r = 29.83 \text{ mOhms}$
- $X_m = 1160 \text{ mOhms}$
- $R_r = 1.92 \text{ mOhms}$
- $R_s = 1.52 \text{ mOhms}$
- $V_{\text{stator}} = 690 \text{ V}$
- Velocidad sincronismo = 1200 r.p.m.

Máquina síncrona XTAR630ZA6R

- Potencia de estátor nominal = 630 kW
- Velocidad nominal = 1320 rpm
- $p = 5$
- Tensión de vacío = 350 V
- $X_d = 0,40738 \text{ Ohms}$
- $X_q = 0,40738 \text{ Ohms}$
- $R_s = 9,97 \text{ mOhms}$
- $I_{\text{snom max}} = 258 \text{ A}$
- Frecuencia = 110 Hz

A partir de la topología definida e implementada en PSCAD y conociendo las características e las máquinas eléctricas utilizadas se muestran las simulaciones realizadas al modelo para comprobar el correcto funcionamiento de los lazos de control:

Se comienza con el funcionamiento de la topología en modo hipersíncrono con $s=10\%$, que equivale a una velocidad de rotor de las máquinas de 1320 r.p.m.

- Control potencia activa y reactiva

La consigna de la potencia activa se obtiene de la curva par-velocidad, donde se tiene que la potencia debe ser 2,2 MW y la consigna de potencia reactiva es igual a cero.

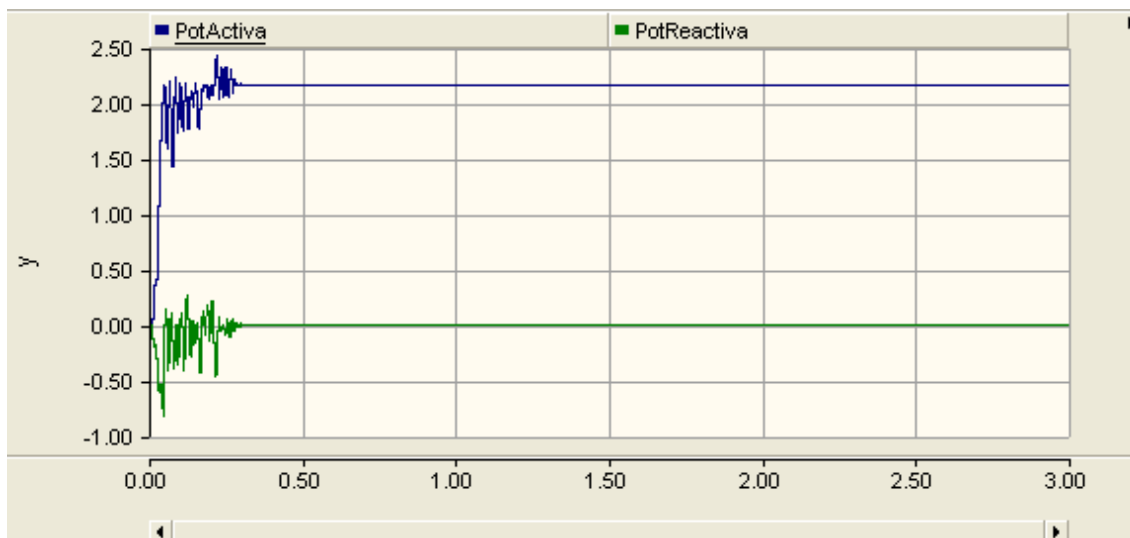


Figura 83. Potencia activa y reactiva del estator de la MADA.

Se observa que efectivamente el control está trabajando de forma correcta ya que tanto la consigna de potencia activa como la de potencia reactiva se cumplen, la simulación muestra los 2,2 MW y los 0 MVar esperados.

- Tensión de bus

Al igual que en las topologías anteriores la consigna de tensión de bus es de 1135 V

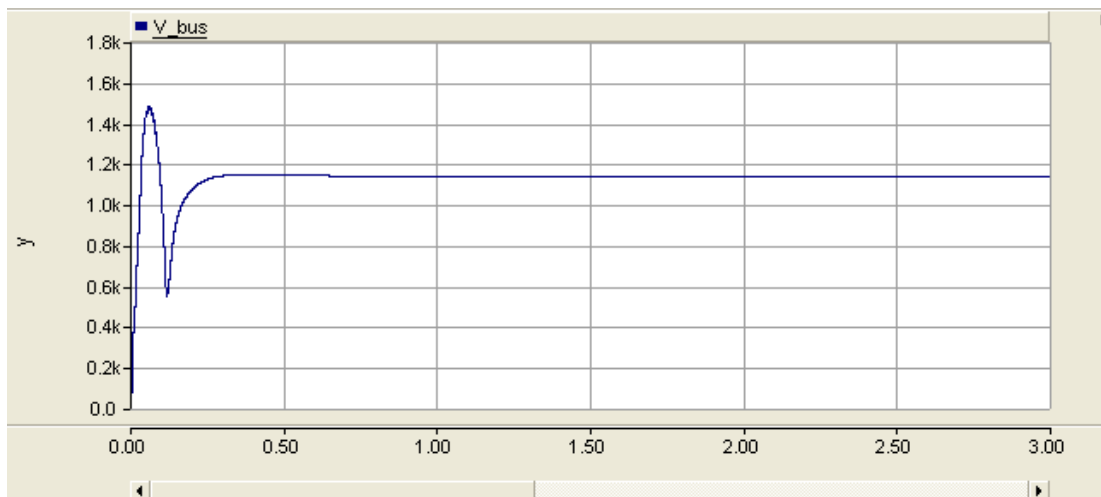


Figura 84. Tensión de bus.

Analizando la respuesta se concluye que tras la estabilización de los lazos de control la señal sigue perfectamente a la referencia manteniendo en el bus una fuente constante de 1135 V.

- Tensiones de estator y rotor

A continuación se muestran las tensiones de estator y rotor de la MADA y la tensión de estator de la máquina síncrona. Comentar que solamente conocemos el valor de la tensión de estator de la MADA que esta conectado a una red de 690 V.

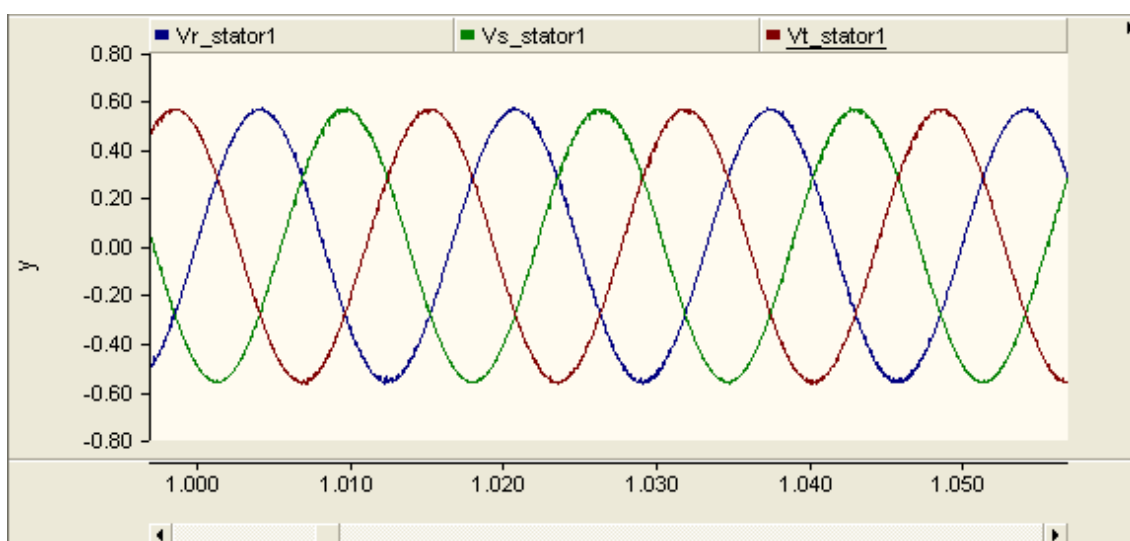


Figura 85. Tensión de estator de la MADA.

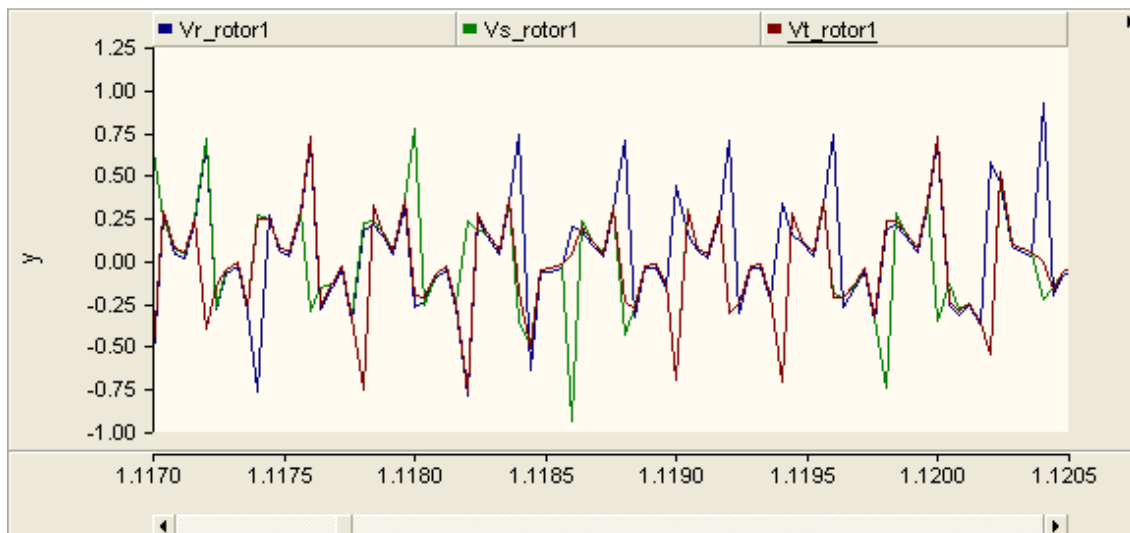


Figura 86. Tensión de rotor de la MADA.

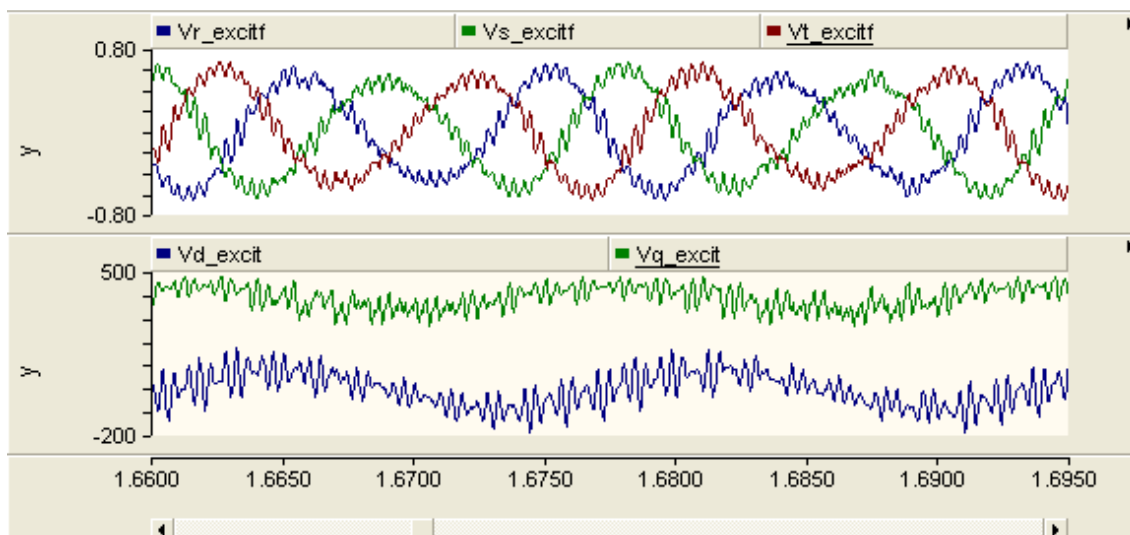


Figura 87. Tensión de estator de la PMG.

Se observa que la tensión de estator es la esperada, la señal tiene su valor pico a 563 V y se ha comentado que la red es de 690 V, esto es debido a que la medición no se ha hecho entre fases sino que se ha hecho entre fase-neutro.

En lo que respecta a la tensión de rotor de la MADA y a la de estator de la PMG se ve con claridad que son señales irregulares, esto es debido a que ambas se ven influenciadas por las inductancias y sobretodo por la acción del convertidor de potencia.

- Moduladoras

A continuación se muestran las moduladoras de ambos lazos de control que generan los disparos de los IGBT, en modulación PWM, para el control de las potencias de estator en un caso y de la tensión de bus en otro.

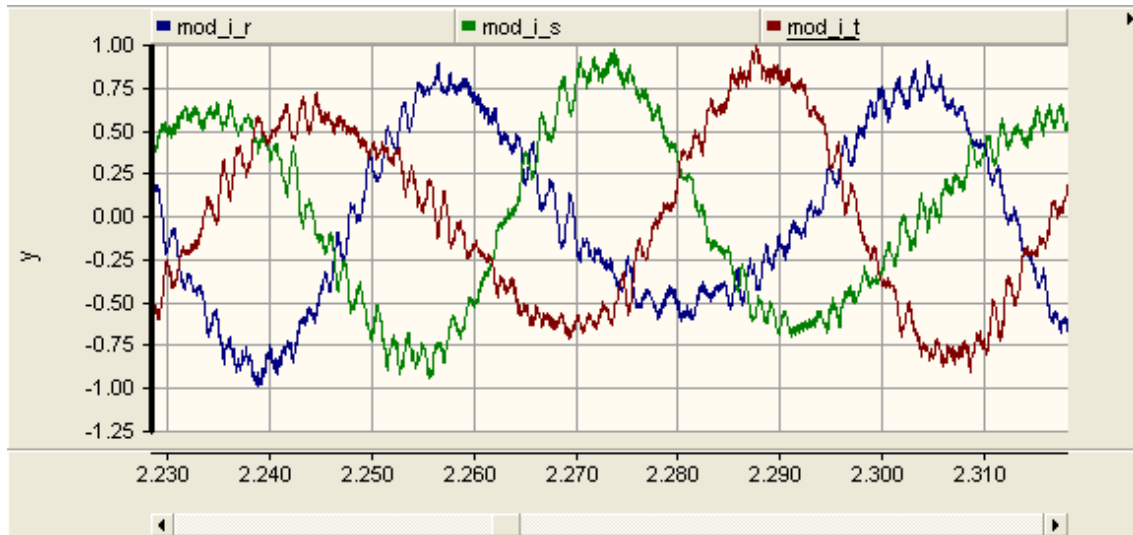


Figura 88. Moduladoras convertidor lado máquina.

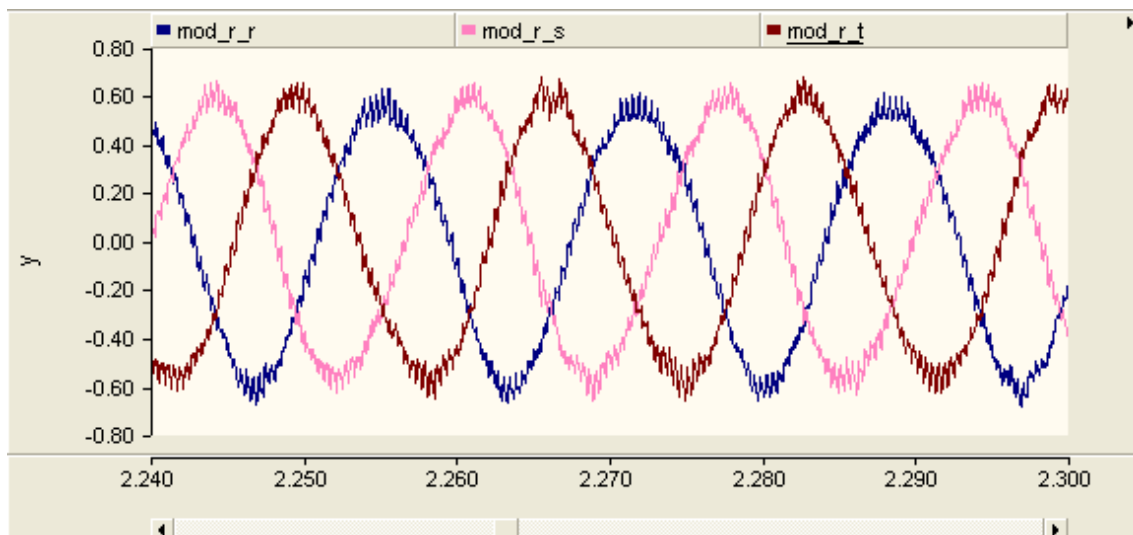


Figura 89. Moduladoras convertidor lado exciter.

Se continúa con el funcionamiento de la topología en modo subsíncrono con a una velocidad de rotor de las máquinas de 700 r.p.m.

- Control potencia activa y reactiva

La consigna de la potencia activa se obtiene de la curva par-velocidad, donde se tiene que la potencia debe ser 0,3 MW y la consigna de potencia reactiva es igual a cero.

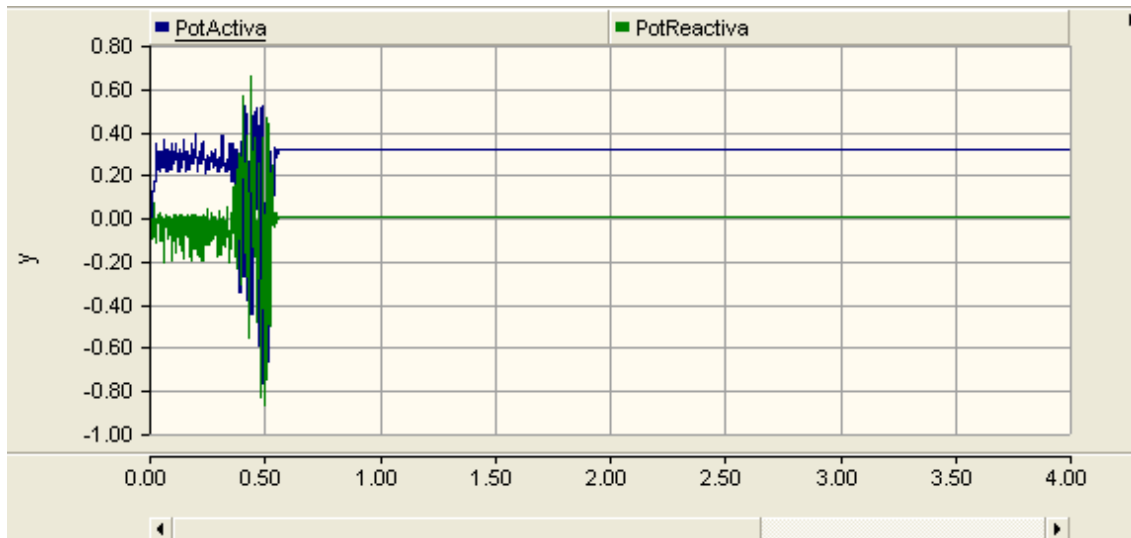


Figura 90. Potencia activa y reactiva de estator de la MADA.

Se observa que efectivamente el control esta trabajando de forma correcta ya que tanto la consigna de potencia activa como la de potencia reactiva se cumplen, la simulación muestra los 0,3 MW y los 0 MVar esperados.

- Angulos

Como ya se ha comentado en el capítulo anterior, en la topología xDFM se necesitan conocer tres ángulos distintos en cada momento que corresponden a las variables del estator de la MADA, a las del rotor de la misma y a las del estator de la PMG.

El ángulo del estator de la MADA se obtiene a partir de la PLL y el del estator de la PMG a partir de la posición del rotor de la misma medida con un encoder, por último se mide la posición del rotor de la MADA con un encoder y se resta al ángulo de la PLL para obtener la posición de las variables del rotor de la MADA.

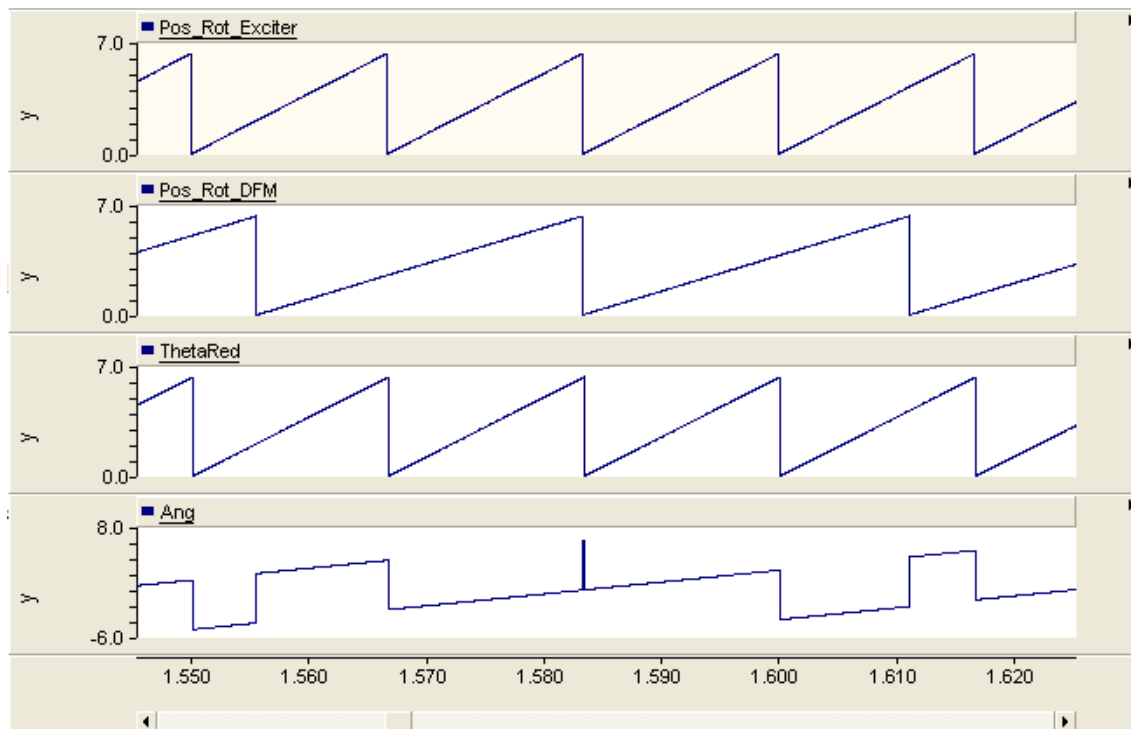


Figura 91. Ángulos necesarios para transformaciones.

De esta simulación se extraen varias conclusiones, la primera es observar las medidas de los encoder (Pos_Rot_Exciter y Pos_Rot_DFM) donde la frecuencia del rotor de la PMG esta alrededor de 60 Hz y la de la MADA es de 35 Hz, son frecuencias esperadas, la segunda es que la PLL da un ángulo de 60 Hz (ThetaRed) debido a la frecuencia de la red a la que esta conectado el estator de la máquina.

El ángulo (Ang) es el resultante de la resta entre ThetaRed y Pos_Rot_DFM, de aquí se obtiene el ángulo de las variables del rotor de la MADA.

A modo de ejemplo se presenta el cambio de abc a dq usando el ángulo de la PLL para la tensión de estator:

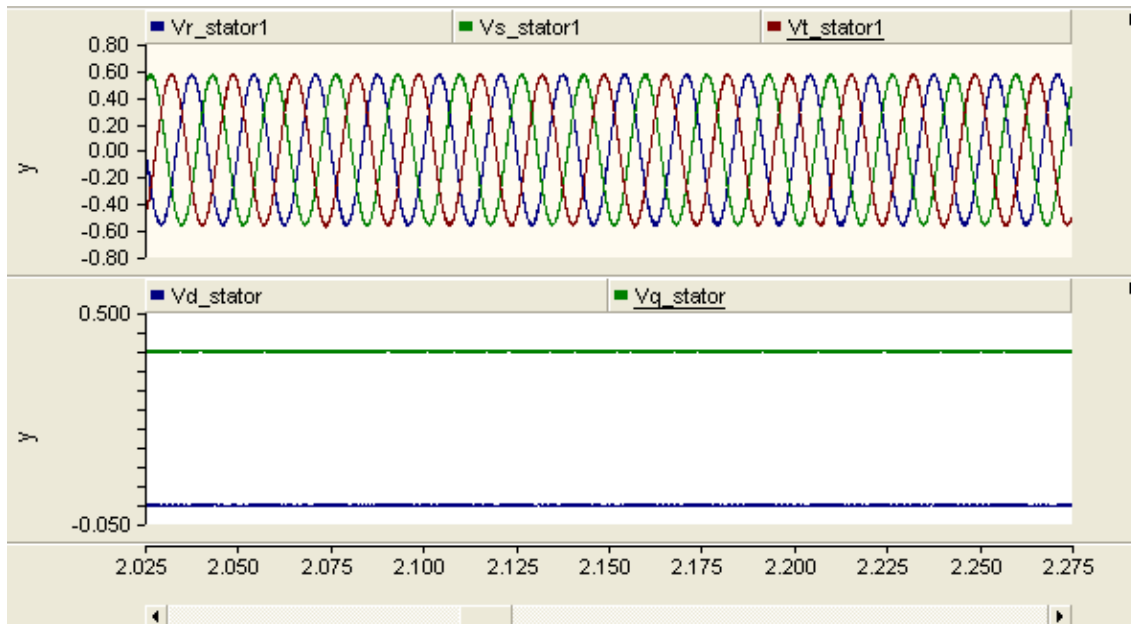


Figura 92. Transformación de Park para tensión de estator de la MADA.

- Intensidades

A continuación se muestran las corrientes que circulan por estator de ambas máquinas y por rotor de la PMG:

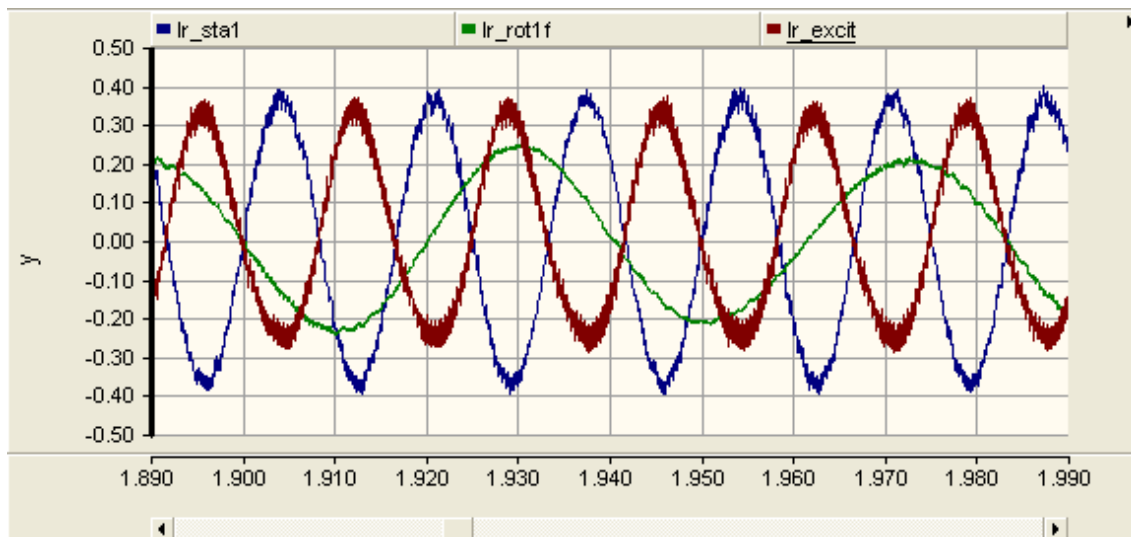


Figura 93. Corrientes por estator y rotor MADA y por estator PMG.

De esta simulación se puede observar las diferentes frecuencias de las señales según el lugar donde circulan, de la misma manera de la que se ha explicado en el punto anterior.

Por último se muestra como al variar la consigna de I_d en el lazo de control del convertidor lado exciter se consigue magnetizar o desmagnetizar la máquina de forma que se controla la amplitud de la tensión.

Para una consigna nula, es decir ni se magnetiza ni se desmagnetiza la máquina se tiene:

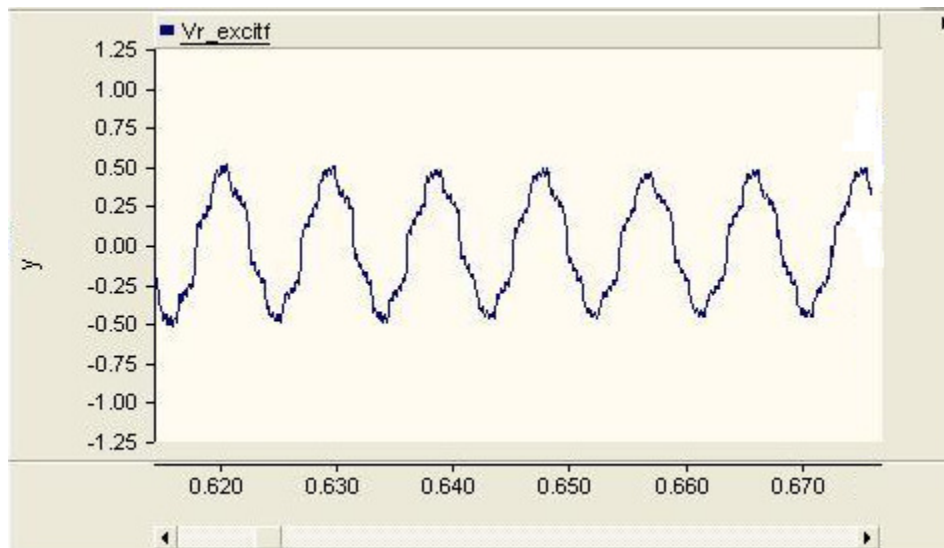


Figura 94. Tensión de estator PMG con consigna nula.

Se introduce una consigna negativa cuyo efecto es el de magnetizar la máquina o que conlleva un aumento en la tensión de estator para las mismas condiciones:

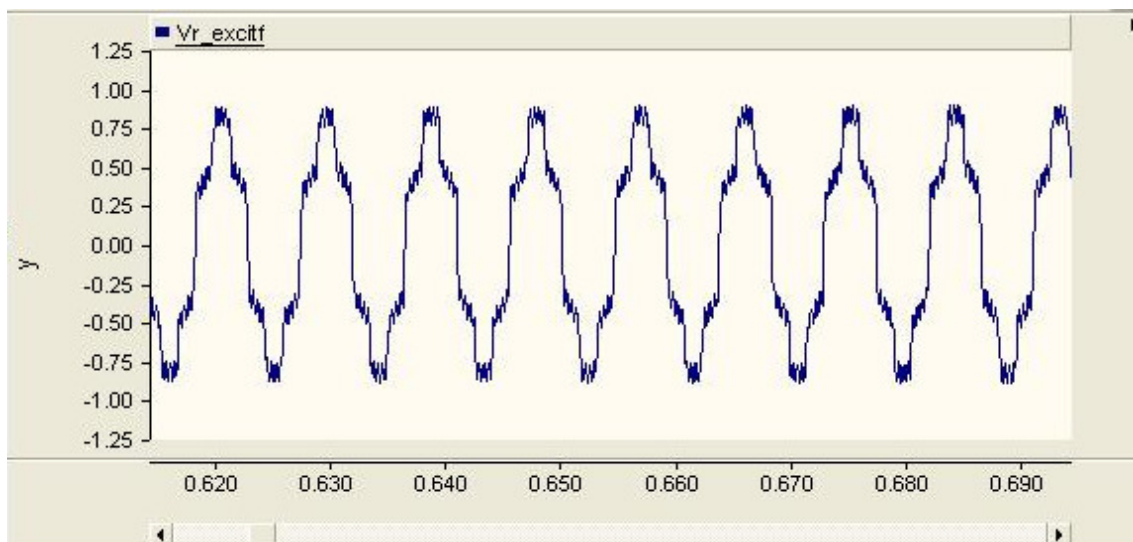


Figura 95. Tensión de estator PMG con consigna negativa.

Al introducir una consigna positiva se desmagnetiza la máquina, este recurso es interesante ya que puede ser utilizado para salvar al convertidor de una sobretensión que cause una sobrecorriente que lo dañe:

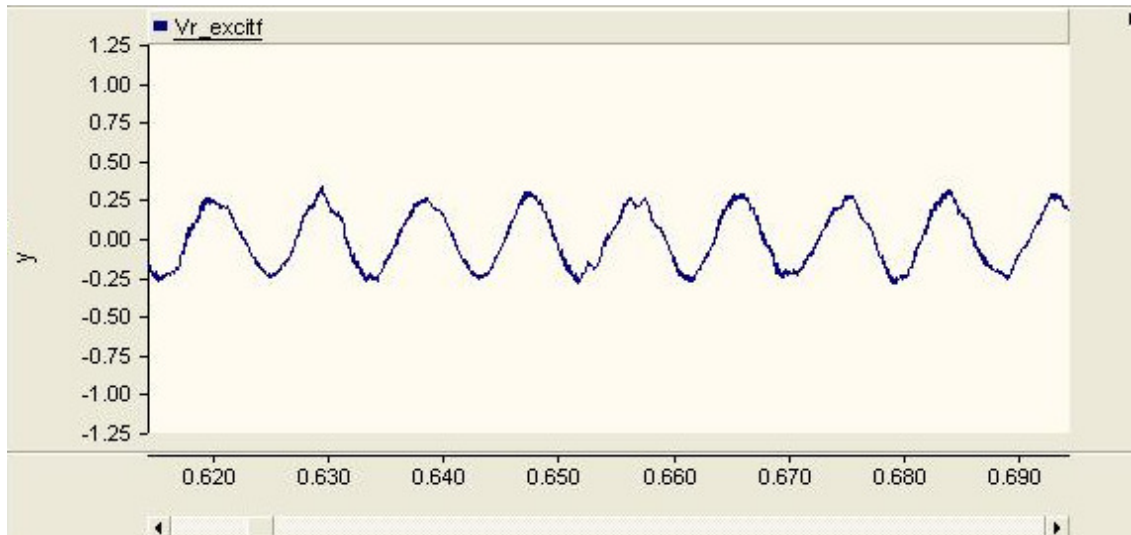


Figura 96. Tensión de estator PMG con consigna positiva.

7. Comparaciones

Como conclusiones se presentan las ventajas y desventajas de cada topología en comparación con ellas mismas.

- Dimensionamiento del convertidor

En la MADA tenemos conectados a red tanto el rotor como el estátor y sacamos potencia por ambos caminos, la mayor parte de ésta la sacamos por el estátor y una pequeña porción por el rotor. En el peor de los casos un tercio de la potencia será evacuada por el rotor, esto significa que el convertidor tiene que tratar un tercio de la potencia total del aerogenerador, es decir se dimensiona para el 30% de la potencia.

En el caso de la Full Converter sólo generamos por el estátor y entonces toda la potencia pasa por el convertidor que se dimensiona para el 100% de la misma. Tratar menos potencia implica tratar menos corriente, por lo que necesitaremos menos elementos y más sencillos.

En el caso de la xDFM a priori da la sensación de que se tiene un convertidor del mismo tamaño que el de la MADA pero en realidad este convertidor debe ser de mayor tamaño debido a que debe gestionar toda la potencia por el estator de la máquina doblemente alimentada.

En definitiva el coste del convertidor de la MADA es algo inferior al de la xDFM y ambos son bastante inferiores al de la full converter.

- Utilización de multiplicadora

En la full converter no necesitamos hacer uso de la multiplicadora, solucionamos el problema de la baja velocidad de giro del rotor aumentando el número de pares de polos del generador. La multiplicadora es un elemento de mucho volumen, peso y coste económico. Está compuesto de engranajes que se desgastan y llevan a que sea un componente crítico del aerogenerador que origina importantes problemas.

- Capacidad de soportar fallos de la red

La configuración Full Converter soporta mejor los fallos en la red debido a que entre ésta y el generador se encuentra el convertidor que hace de muro y es capaz de variar la señal que llega al generador de forma que éste no se entere del fallo. En el caso de la MADA y la xDFM al estar el estator directamente conectado a la red cualquier fallo de ésta afecta de forma directa al generador.

- Sistema HVDC de transmisión de energía

Este sistema de transmisión de energía eléctrica utiliza corriente continua de alta tensión, en distribuciones largas son más económicos y se sufren menos pérdidas eléctricas. Son muy utilizados en líneas de distribución submarinas, con lo que cobran gran importancia para la distribución de energía producida en parques off-shore.

Para la configuración de la MADA no es posible realizar la conexión HVDC debido a que el sistema está conectado a la red tanto por estator de la máquina como por rotor a través del convertidor. En el caso de la full converter esta conexión sería posible pero no es rentable desde el punto de vista económico.

En la topología xDFM la entrega en continua se puede realizar de dos maneras, utilizando un generador de alta tensión con un rectificador o con un generador de baja tensión y un transformador seguido de un rectificador.

- Control del sistema

En lo que se refiere a la implementación de los lazos de control el proceso es similar en las tres topologías no habiendo grandes diferencias, esto es debido a que el sistema de conversión trata de un convertidor back to back en los tres casos y comparten muchas similitudes.

8. Bibliografía

- Manual interno área eólica. Ingeteam Energy S.A.
- Apuntes Máster Universitario en Energías Renovables: Generación eléctrica de la Upna.
- POWER ELECTRONICS. Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins – Ed. John Wiley & Sons 2003.
- MÁQUINAS ELÉCTRICAS. Stephen J. Chapman. Ed. McGraw Hill 2000.